

# **Teräsristikkokehän parametrisoitu aloitusmalli ja tiedonsiirto tietomal- lien välillä**

Matias Vähäkangas

Opinnäytetyö

Toukokuu 2020

Tekniikan ja liikenteen ala

Insinööri (AMK), rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma

Tekijä(t) Vähäkangas, Matias	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK	Päivämäärä Toukokuu 2020
	Sivumäärä 65	Julkaisun kieli Suomi
		Verkojulkaisulupa myönnetty: x
Työn nimi <b>Teräsristikkekehän parametrisoitu aloitusmalli ja tiedonsiirto tietomallien välillä</b>		
Tutkinto-ohjelma Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutusohjelma		
Työn ohjaaja(t) Marko Viinikainen, Jussi Korpinen		
Toimeksiantaja(t) Vahnen Jyväskylä Oy		
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää Vahnen Jyväskylä Oy:lle teräsrakenteisen hallin kattoristik- kon mitoitusmallin parametrinen Excel-aloitustaulukko. Taulukon avulla saadaan parametrisesti muo- dostettua laskentaohjelmaan nappia painamalla lähtötietojen mukainen kattoristikon laskentamalli. Opinnäytetyössä käydään lisäksi läpi avoimen ohjelmistorajapinnan hyödyntämistä rakennesuunnit- telussa, suunnitteluperusteita sekä teräsristikkekehän rakenteiden mitoitusmallia. Tiedonsiirtoa käsitte- levässä osiossa tutkitaan tietomallien tiedonsiirtoa Tekla Structuresin ja Robot Structuralin Ana- lysisin välillä.</p> <p>Aloitustaulukosta saa rakennuksesta syötettyjen lähtötietojen perusteella kattoristikoon kohdistu- vat kuormat, joita ovat rakenteiden omapainot, lumi- ja tuulikuormat. Käyttäjän syöttäessä erikseen kattoristikon eri sauvoille profiilikoot, taulukko antaa vastaukseksi kyseisten profiilikokojen käyttö- asteet. Profiilikokojen määrityksen jälkeen ristikko voidaan muodostaa painamalla taulukossa ole- vaa nappia laskentaohjelma Robot Structuraliin, johon se muodostuu lähtötietojen mukaisena kat- toristikona sisältäen kuormat ja sauvojen profiilikoot. Parametrisesta työkalusta tehtiin myös käyt- töönottosuunnitelma.</p> <p>Opinnäytetyössä käydään läpi suunnitteluperusteet, lumi- ja tuulikuormien määrittäminen ja esi- merkkilaskenta suunnitteluperusteista ja kattoristikon alustavasta mitoitusmallista eli rakenteista, jotka voidaan laskea parametrisella työkalulla. Liitetiedostoissa lasketaan teräsrakenteisen hallin ra- kenteista pilarit rasiuksia vastaan.</p> <p>Opinnäytetyön tuloksena saatiin yritykselle kattoristikon mitoitusmalli, jonka avulla suunnittelu ja laskentamallin muodostaminen nopeutuvat. Työkalua on myös tarkoitus kehittää jat- kossa erilaisten ristikkotyypin ja pilarien laskentaan. Tiedonsiirto-ohjelmien ansiosta mallinnus- työt saadaan nopeutettua, kun mallinnusta ei tarvitse tehdä erikseen eri ohjelmissa.</p>		
Avainsanat (asiasanat) parametrinen suunnittelu, ohjelmistorajapinta, teräsmitoitus, teräsrakenne, tiedonsiirto		
<p>Muut tiedot (Salassa pidettävät liitteet)</p> <p>Liitteet 4, 5, 6 ja 7 ovat salassa pidettäviä, ja ne ovat poistettu julkisesta työstä. Salassapidon perusteena on viranomaisten toiminnan julkisuudesta annetun lain (621/1999) 24 §:n kohta 21: Teknologista taikka muuta kehitystyötä ja niiden arviointia koskevat tiedot. Salassapitoaika on kymmenen (10) vuotta. Salassapito päättyy 30.4.2030.</p>		

Author(s) Vähäkangas, Matias	Type of publication Bachelor's thesis	Date May 2020
		Language of publication: Finnish
	Number of pages 65	Permission for web publication: x
Title of publication <b>Parametric tool for steel truss design and data transfer between BIM models</b>		
Degree programme Construction and Civil Engineering		
Supervisor(s) Viinikainen, Marko; Korpinen, Jussi		
Assigned by Vahanen Jyväskylä Ltd.		
<p>Abstract</p> <p>The objective was to develop a parametric tool in Microsoft Excel for Vahanen Jyväskylä Ltd. to design a truss of a steel structured hall. With the parametric tool, the user can generate a calculation model of the truss which is in accordance with the initial data to a structural analysis program. The thesis also discusses the use of application programming interface (API) in structural engineering, the design basis, and the structural design of a steel truss. The data transfer part of the thesis is about studying data transferring between BIM model programs Tekla Structures and Robot Structural Analysis.</p> <p>The parametric tool calculates wind forces, permanent loads and snow loads of the truss based on the initial data about the building. User needs to add a cross-section for steel truss and then the tool shows how resistant the cross-section is against the forces. After selecting the cross-sections, the designed steel truss can be modeled parametrically to Robot Structural Analysis program where it generates as a steel truss containing the forces and cross-sections. Also, an initialization plan was developed for the parametric tool.</p> <p>The thesis covers design basis, defining wind forces and snow loads and an example calculation about design basis and preliminary design for a steel truss which can be designed with the parametric tool. The durability of a steel column against stresses is calculated in appendixes.</p> <p>As a result of the thesis, the client obtained a tool which can be used to design a steel truss and which facilitates the design and makes forming calculation models quicker. The objective is to develop the parametric tool to design columns and different steel truss types. The data transfer applications make modeling quicker as it is not necessary to do modeling in many programs.</p>		
Keywords/tags (subjects) parametric design, API, steel design, steel structure, data transferring		
<p>Miscellaneous (Confidential information)</p> <p>Appendixes 4,5,6 and 7 are confidential which have been removed from the public thesis. Ground for secrecy: Act on the Openness of Government Activities 621/1999, 24 §, Section 21: Documents concerning the basic materials for a dissertation or other scientific study, technological or other development project. Period of secrecy is ten years and it ends 30.4.2030.</p>		

## Sisältö

<b>Käsitteet .....</b>	<b>4</b>
<b>1 Johdanto .....</b>	<b>6</b>
1.1 Toimeksiantaja Vahanen Jyväskylä Oy .....	6
1.2 Aihe ja tavoite .....	6
1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuskysymykset .....	7
<b>2 Aloitustaulukko laskentamallin muodostamiseksi .....</b>	<b>9</b>
2.1 Työkalun rakentaminen .....	9
2.2 Työkalun toiminta ja rakenteiden määrittäminen .....	10
2.3 Ohjelmoinnin perusteet aloitustaulukossa .....	14
2.4 Ohjelmistorajapinnan hyödyntäminen ja tietojen siirto Robottiin .....	15
<b>3 Suunnitteluperusteet ja teräsristikkokehän rakenteiden mitoitus .....</b>	<b>17</b>
3.1 Suunnitteluperusteet .....	17
3.2 Kuormien määrittäminen .....	20
3.2.1 Kuormien määräytyminen .....	20
3.2.2 Tuulikuorman laskeminen .....	20
3.2.3 Lumikuorman laskeminen .....	23
3.3 Teräsristikkokehän mitoitus .....	26
3.3.1 Käsitteitä .....	26
3.3.2 Pilarien mitoitus .....	27
3.3.3 Kattoristikkeen mitoitus .....	35
<b>4 Tiedonsiirto-ohjelmien kuvaus .....</b>	<b>37</b>
4.1 Tiedonsiirto tietomallin ja rakennemallin välillä .....	37
4.2 Tiedonsiirto-ohjelmien tutkiminen .....	38
4.3 Robot Link .....	38
4.4 Rakenteen vienti Robotista Teklaan käyttäen CIS/2-formaattia .....	41
4.5 Rakenteen vienti Teklasta Robottiin käyttäen CIS/2-formaattia .....	43
<b>5 Esimerkkilaskelma .....</b>	<b>46</b>
5.1 Esimerkkirakennuksen lähtötiedot .....	46

	2
5.2 Suunnitteluperusteet .....	46
5.3 Kattoristikon mitoitus .....	48
<b>6 Käyttöönottosuunnitelma parametriselle työkalulle.....</b>	<b>50</b>
<b>7 Pohdinta ja johtopäätökset .....</b>	<b>51</b>
<b>Lähteet .....</b>	<b>53</b>
<b>Liitteet .....</b>	<b>56</b>
Liite 1. Kuormien laskenta pilarille .....	56
Liite 2. Kuormitusyhdistelmien määrittäminen pilarin mitoitukseen.....	57
Liite 3. Pilarin mitoitus.....	59

## Kuviot

Kuvio 1. Aloitustaulukon avulla siirretty ristikko Robot Structuralissa .....	13
Kuvio 2. Aloitustaulukon avulla muodostettu ristikko valituilla profiileilla .....	13
Kuvio 3. Esimerkki API:n hyödyntämisestä Excelin ja Robotin välillä .....	16
Kuvio 4. Maastoluokat 0-IV .....	21
Kuvio 5. Tiedonsiirto tietomallin ja rakennemallin välillä.....	37
Kuvio 6. Robot Link- asetusten määrittäminen Teklassa.....	39
Kuvio 7. Analyysimallin muodostuminen Robottiin Robot Linkin avulla .....	39
Kuvio 8. Tietojen tuonti Robotista Teklaan käyttäen Robot Link -lisäosaa.....	40
Kuvio 9. Tiedoston tallennus .stp-muotoon Robotissa.....	41
Kuvio 10. Import-toiminto Teklassa .....	42
Kuvio 11. Rakenteen tuontiasetukset Teklassa .....	42
Kuvio 12. Valmis Robotista siirretty rakenne Teklassa .....	43
Kuvio 13. Tiedoston vienti .stp-muotoon Teklassa.....	44
Kuvio 14. Tuontiasetukset Robotissa.....	44
Kuvio 15. Teklasta tuotu rakenne Robotissa .....	45

## Taulukot

Taulukko 1. Seuraamusluokkien ja kuormakertoimien määräytyminen .....	19
Taulukko 2. Tuulensuojaisuuskertoimen $C_e$ muodostuminen .....	25
Taulukko 3. Korotuskertoimet lumikuorman määrittämiseen rakennuksille, jonka lyhyempi sivu on vähintään 50 m pitkä .....	25
Taulukko 4. Poikkileikkausluokan määrittäminen .....	28
Taulukko 5. Pienennystekijän $\chi_w$ määrittäminen .....	30
Taulukko 6. Raja-arvot suorakaideputkille, jolloin kiepahduskestävyyttä ei tarvitse laskea .....	32

## Käsitteet

### Parametrinen suunnittelu

Parametrisessa suunnittelussa rakenteen geometriaa ja osia voidaan muuttaa automaattisesti lähtötietojen perusteella. (Parametric Modelling n.d)

### Tietomalli

Tietomalli on rakennuksesta tietokoneella tehtävä 3D-malli, jossa on koottuna yhteen rakennuksen tiedot. Tietomallin avulla voidaan tuottaa myös piirustuksia. (Tietomallinnus n.d)

### Teräsristikkokehä

Teräsrakenteisen hallin rakenne, joka käsittää pilarit ja kattoristikon sekä niiden liitokset.

### Aloitustaulukko

Excel-tilukko, jonka avulla rakennuksen lähtötietojen perusteella voidaan määrittää teräsristikkokehään tarvittavien rakenneputkien profiilikoot.

### Avoin ohjelmistorajapinta (Open API)

Avoin ohjelmistorajapinta on ohjelmien kehittämiseen käytettävä työkalu, jossa käytetään koodeja, joilla voidaan siirtää tietoa ohjelmasta toiseen. (Gawęda & Kosakowski 2015.)

### Seuraamusluokka

Rakennukselle muodostetaan suunnitteluvaiheessa seuraamusluokka, joka perustuu rakenteiden sortumisen aiheuttamaan vakavuuteen ihmishenkien ja ympäristövahinkojen osalta. Seuraamusluokkia ovat CC1, CC2 ja CC3. (RIL 201-1-2017, 26.)

### Suunniteltu käyttöikä

Suunnittelussa rakennukselle asetettu käyttöikätaivoite, joka rakennuksen täytyy kestää ilman laajoja korjauksia. (RIL 201-1-2017, 21.)

**Murtorajatilamitoitus**

Rakenteiden mitoitusvaihe, jossa rakenteille kohdistuvat kuormat on kerrottu osavarmuuskertoimilla. Murtorajatilassa tutkitaan rakenteen sortumista ja vaurioitumista (RIL 201-1-2017, 21).

**Käyttörajatilamitoitus**

Käyttörajatila on rakenteiden mitoitusvaihe, jossa rakenteille kohdistuvat kuormat on otettu huomioon ilman osavarmuuskertoimia. Käyttörajatilasta ylityksen jälkeen käyttökelpoisuusvaatimukset eivät enää päde (RIL 201-1-2017, 21).

**Pysyvät kuormat G**

Pysyvät kuormat käsittävät rakennuksen rakenteista tulevat omapainot, kuten pilarit, palkit ja seinä- ja kattorakenteet.

**Muuttuvat kuormat Q**

Muuttuvat kuormat Q käsittävät lumi- ja tuulikuormat, jotka muuttuvat rakennuksen ympärillä sekä hyötykuormat (RIL 201-1-2017, 31). Muuttuvien kuormien arvot vaihtelevat ajan myötä (RIL 201-1-2017, 21).

**Robot Structural Analysis**

Autodesk-yhtiön kehittämä laskentaohjelma rakenteiden mitoitukseen, joissa voidaan muodostaa mitoitettavasta rakenteesta laskentamalli, josta saadaan laskettua siihen kohdistuvat kuormat ja rasitukset. (Robot Structural Analysis Professional n.d.)

**Tekla Structures**

Tietomalliohjelmisto, jolla voidaan mallintaa rakennuksen eri osat ja rakenteet. Teklalla voidaan tehdä teräs-, puu- ja betonisuunnittelua. Lisäksi ohjelmalla voidaan valmistaa betonielementtien ja teräsrakenteiden valmistuspiirustuksia ja tehdä rakenteiden yksityiskohtaista suunnittelua. (Tekla Structures n.d.)



# 1 Johdanto

## 1.1 Toimeksiantaja Vahanen Jyväskylä Oy

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Vahanen Jyväskylä Oy, joka on osa Vahanen-yhtiötä. Vahanen on suomalainen kiinteistö- ja rakennusalan suunnittelu- ja konsulttitoimisto, joka tarjoaa ratkaisuja ja palveluita korjaus- ja uudisrakentamiseen, arkkitehtuuriin, valvontaan, tutkimuksiin sekä kiinteistön elinkaareen. Vahanen-yhtiöt koostuvat 11 eri yrityksestä, joissa työskentelee yhteensä yli 500 asiantuntijaa 11 eri paikkakunnalla Suomessa. (Tietoa Vahasesta n.d.)

Vahasen Jyväskylän toimipiste palvelee asiakkaitaan rakennuttamisessa, valvonnassa, kuntotutkimuksissa ja rakennesuunnittelussa sekä korjauskohteisiin että uudisrakennuksiin. Vahanen Jyväskylä Oy:ssa työskentelee tällä hetkellä 18 asiantuntijaa.

## 1.2 Aihe ja tavoite

Opinnäytetyö keskittyy teräsrakenteiden suunnitteluun ja mitoittamiseen. Opinnäytetyössä tehdään Vahanen Jyväskylä Oy:lle parametrinen työkalu, jolla voidaan määrittää teräsristikkokehään tarvittavat profiilikoot taulukkoon syötettävien lähtötietojen perusteella. Profiilin määrittämisen jälkeen työkalulla voidaan muodostaa teräsristikkokehän laskentamalli ohjelmaan nimeltä Robot Structural Analysis Professional. Parametrinen työkaluun liittyen tehdään suunnitelma sen käyttöönotosta ja testauksesta. Lisäksi opinnäytetyössä tehdään esimerkkilaskelma suunnitteluperusteista, teräsristikon alustavasta mitoittuksesta ja mitoittetaan teräspilari. Tiedonsiirtoa käsittelevässä luvussa tutkitaan ohjelmia, joiden avulla tietoa voidaan siirtää nopeasti ohjelmasta toiseen.

Parametrinen suunnittelun avulla saadaan muodostettua malliin geometrian muutoksia reaaliaikaisesti, kun lähtöarvoja muutetaan. Suunnittelun parametrisoinnin kautta työmäärää saadaan pienennettyä ja sitä kautta työteho ja tarkkuus lisääntyvät. 3D-parametrien avulla voidaan muodostaa monimutkaisia

rakenteita ja tietoja voidaan siirtää ohjelmien välillä. (Parametric Modelling n.d)  
 Parametreja voidaan käyttää hyödyksi esimerkiksi laskettaessa rakennukseen kohdistuvia kuormia ja rasituksia, joiden kautta saadaan laskettua tarvittavat profiilikoot rakenteille. Rakenteiden mitoituksen parametrisointi nopeuttaa työskentelyä, koska samoja työvaiheita ei tarvitse tehdä useaan kertaan.

Ohjelmien kehittyessä myös suunnittelun luonne muuttuu. Mallinnusohjelmien kehittyminen on johtanut monimutkaisempiin rakenteisiin. Nykyään voidaan tuottaa lyhyessä ajassa ohjelmien avulla tuloksia, joiden saavuttamiseen on aiemmin ennen suunnitteluohjelmistojen kehittymistä mennyt jopa viikkoja. (Stocking 2016.)

### 1.3 Tutkimusmenetelmät ja tutkimuskysymykset

#### **Tutkimuskysymykset**

Tutkimuskysymykset liittyvät parametrisoinnin hyödyntämiseen ja avoimen ohjelmistorajapinnan käyttämiseen ohjelmien väliseen toimintaan. Parametrinen aloitustaulukon osalta tutkitaan, kuinka paljon parametrisointia voidaan hyödyntää teräsrakenteiden mitoituksessa. Parametrinen aloitustaulukon on toimittava niin, että sen käyttäjän tarvitsee syöttää sinne vain lähtötiedot kohteesta sekä kokeiltavat profiilikoot, jonka jälkeen se toimii automaattisesti laskien kuormat ja profiilien käyttöasteet kuormituksille.

Tutkimuskysymyksiä ovat:

- Kuinka paljon parametrisointia voidaan hyödyntää aloitustaulukossa?
- Miten avointa ohjelmistorajapintaa voidaan hyödyntää?
  - Ohjelmoinnin perusteet
- Miten teräsristikkokehän rakenteet mitoitetaan?

### **Tutkimusmenetelmät**

Opinnäytetyön eri osissa käytetään erilaisia tutkimusmenetelmiä. Opinnäytetyön tuloksena on työkalu ristikkorakenteiden mitoitukseen, missä on hyödynnetty parametreja ja koodaamista. Työssä on tutkittu lisäksi ohjelmistorajapinnan hyödyntämistä rakennesuunnittelussa. Tutkimusmenetelmältään työkalun rakentamisen ja ohjelmistojen välinen tiedonsiirron kehittäminen ovat kehittämistutkimusta, koska tavoitteena on muutoksen tekeminen (Kananen 2017, 49).

Teräsristikkekehän rakenteiden mitoitus perustuu standardeihin ja eurokoodeihin, joiden mukaan rakenteet täytyy laskea. Mitoitusosiossa rakenteiden mitoituksessa käytetään kvantitatiivista tutkimusmenetelmää. Rakenteiden mitoituksessa asetetaan hypoteesiksi se, että mitoittavien rakenteiden täytyy kestää niille tulevat kuormat. Laskelmat tehdään ohjeiden ja säännösten mukaisesti, joilla testataan, voidaanko tutkimuskysymyksessä asetettu hypoteesi todistaa oikeaksi.

## 2 Aloitustaulukko laskentamallin muodostamiseksi

Parametrisen aloitustaulukon on tarkoitus avustaa rakenteiden suunnittelussa ja nopeuttaa suunnittelun eri vaiheita, joita täytyy toistaa teräsrakenteita suunniteltaessa. Taulukko muodostetaan Microsoft Excel -ohjelmaan, jonka kaava- ja parametrikäskyillä parametrinen työkalu rakennetaan. Taulukko määrittää teräsristikkokehän kattoristikon eri osille, kuten ylä- ja alapaarteelle sekä uumasauvoille tarvittavan poikkeileikkauskoon eurokoodien mukaisesti. Profiilin määrittämisen jälkeen aloitustaulukosta on mahdollista yhdellä painalluksella siirtää teräsristikko valituilla profiileilla Robot Structural Analysis -ohjelmaan, jonne se muodostuu ristikkorakenteena, jossa ylä- ja alapaarteet sekä ristikon diagonaalit ovat oikeissa paikoissaan ja niissä on aloitustaulukossa määritetyt teräsputkiprofiilit. Laskentamallin muodostamisen jälkeen teräsristikkokehään kohdistuvat rasitukset voidaan lasketa ja todeta, että rakenne kestää annetuilla profiileilla siihen kohdistuvat kuormat. Tärkeää taulukossa on rakenteiden mitoittamisen helpottaminen sekä automatisoiminen, joten taulukkoon syötetään mahdollisimman vähän tietoja itse.

Tässä luvussa käydään läpi työkalun rakentaminen sekä tutkitaan ohjelmistorajapinnan hyödyntämistä. Lisäksi luvussa kerrotaan ohjelmoinnin perusteista sekä teräsristikkokehän muodostamisesta laskentaohjelmaan avoimen ohjelmistorajapinnan avulla. Kuvat parametrisesta aloitustaulukosta ovat liitteissä 4 ja 5 (salaiset liitteet).

### 2.1 Työkalun rakentaminen

Työkalun rakentaminen aloitettiin Excelissä teräsristikkokehän suunnitteluun tarvittavien lähtötietojen kokoamisella. Tarvittavia lähtötietoja ovat rakennuksen mitat, kattoristikon geometria ja katon kaltevuuskulma. Seuraavaksi työkaluun rakennettiin kaavat, joilla lasketaan rakennukseen kohdistuvat eri kuormat ja niiden ominais- ja laskenta-arvot. Työkalu laskee automaattisesti kuormien eri arvot kuormitusvälin ja rakenteille annettavien kuormien lähtötietojen avulla. Kuormat on jaettu rakenteiden omapainoon ja muuttuviin kuormiin eli lumi-, hyöty- ja tuulikuormaan. Oma-

paino-osiossa taulukkoon syötetään yläpohjan kuormat ja ripustuskuormat, jotka voivat koostua esimerkiksi ristikkoon kiinnitettävistä varusteista kuten ilmanvaihtoputkista.

Lähtötietojen ja kuormien määrittämisen jälkeen alkoi teräsristikkoon tarvittavien paarteiden mitoittamiseen tarvittavien kaavojen määrittäminen Exceliin. Tavallisessa harjakattoristikossa yläpaarre on puristettu rakenne ja alapaarre vedetty rakenne. Kaavojen rakentamisen jälkeen alkoi ohjelmistorajapinnan hyödyntäminen tiedonsiirtoon Excelin ja Robot Structuralin välillä. Ohjelmistorajapinnassa käytettiin koodeja, joilla saadaan haettua taulukosta ristikon sauvojen koordinaatit, kuormat ja poikkileikkaukset.

## 2.2 Työkalun toiminta ja rakenteiden määrittäminen

### Rakennuksen ja kattoristikon geometria

Aloitustaulukon ensimmäisessä osiossa lisätään rakennuksen ja halutun ristikkorakenteen geometriaan liittyvät tiedot. Taulukko käyttää syötettyjä tietoja kattokaltevuuden, ristikon uumasauvojen jaon ja tuulikuorman laskemiseen. Syötettäviä tietoja ovat:

- rakennuksen seuraamusluokka
- rakennuksen leveys, pituus ja vapaa korkeus
- kattorakenteiden korkeus ja ristikon jänneväli
- kattoristikon kokonaiskorkeus ja tukikorkeus
- yläpaarteiden aukkojen väli.

### Kuormien määrittäminen taulukon avulla

Jotta paarteet ja diagonaalit saadaan mitoitettua ristikkoon, täytyy ristikkoon kohdistuvat kuormat laskea oikein. Taulukon seuraavassa osiossa on pysyvien sekä muuttuvien kuormien laskenta, jotka taulukko laskee annettujen lähtötietojen perusteella. Syötetyn seuraamusluokan perusteella kuormien varmuuskerroin muuttuu seuraamusluokasta riippuen 0,9-1,1-kertaiseksi. Varmuuskerroin seuraamusluokassa CC2 ovat: omapainoille 1,15, lumikuormalle 1,5 ja tuulikuormalle 0,90.

### **Pysyvät kuormat**

Pysyviin kuormiin lisätään kattorakenteista tulevat omapainot sekä mahdollisesti katonistikkoon tai yläpohjaan kiinnitettävät ripustuskuormat. Näiden tietojen perusteella laskee omapainojen neliö- ja metrikuormat.

### **Muuttuvat kuormat**

Muuttuviin kuormiin lasketaan tässä taulukossa lumi- ja hyötykuormat, tuulikuorma on jaettu muuttuvista kuormista omaan osioon. Muuttuvien kuormien osalta laskentaperiaate toimii samalla tavalla kuin pysyvissä kuormissa, tuloksena ovat niiden neliö- ja metrikuormat. Taulukon käyttäjä syöttää rakennuksen paikkakunnalla maassa olevan lumikuorman neliöpainon, jonka jälkeen taulukko laskee rakennuksen katolla olevan lumikuorman. Taulukko huomioi kuorman määrittämisessä rakennuksen katon muotokertoimen  $\mu$ , tuulensuojaisuuskertoimen  $C_e$  sekä lämpökertoimen  $C_t$ .

### **Tuulikuorma**

Tuulikuorman laskenta on erotettu muuttuvista kuormista omaksi osioksi kuormien laskennassa. Se määritetään taulukossa automaattisesti rakennuksen sivumittojen, korkeuden ja maastoluokan avulla. Käyttäjän täytyy syöttää rakennuksen lähtötietojen lisäksi pelkästään rakennuksen sijaintipaikassa vallitseva maastoluokka, jonka avulla taulukko määrittää tuulikuorman arvon neliökuormana ja metrikuormana. Tuulikuorma lasketaan RIL 201-1-2017 ohjeen mukaan tuulen puuskanopeuspaineen ja osapintojen painekertoimien avulla.

### **Alustava yläpaarteen mitoitus**

Excel laskee alustavat sauvavoimat ylä- ja alapaarteelle. Taulukon avulla alustava sauvojen mitoitus perustuu alustaviin sauvavoimiin, jotka taulukko laskee automaattisesti lähtötietojen perusteella. Alustavat sauvavoimat ylä- ja alapaarteelle lasketaan jakamalla ristikon maksimimomentti ristikon kokonaiskorkeudella. Annettujen lähtötietojen avulla taulukko laskee paarteen nurjahduspituuden. Taulukkoon syötetään kokeiltavan yläpaarteen dimensiot, joiden perusteella taulukkoon tulee esiin automaattisesti profiilin pinta-ala, jäyhyysmomentti ja taivutusvastus. Ohjelma laskee ylä-

paarteen kestävyys- ja taivutuskestävyyden sekä näiden kahden yhteisvaikutuksen kautta. Laskennan jälkeen näkyviin tulevat käyttöasteet kyseisistä kestävyysistä, joista nähdään heti, kestäkö rakenneputki sille tulevat kuormitukset.

### **Alustava alapaarteen mitoitus**

Alapaarteen alustavassa mitoituksessa mitoitusvoimana käytetään samaa voimaa kuin yläpaarteelle. Harjaristikon mitoituksessa alapaarre on vedetty rakenne, joten sen osalta tarvitsee tarkastella vain poikkileikkauksen vetokestävyyttä. Taulukkoon lisätään yläpaarteen tapaan poikkileikkauksen lähtötiedot, jonka perusteella taulukko laskee poikkileikkauksen vetokestävyyden. Taulukko vertaa laskettua vetokestävyyttä alustavaan sauvavoimaan ja ilmoittaa sen käyttöasteen.

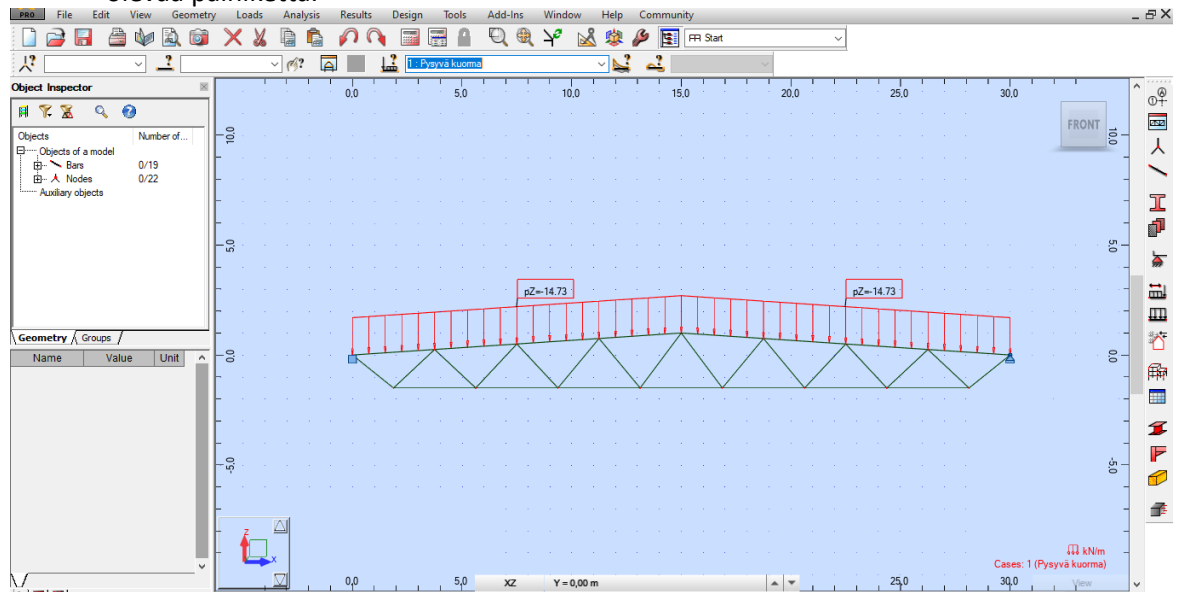
### **Alustava diagonaalien mitoitus**

Diagonaalien mitoitus perustuu myös alustaviin sauvavoimiin, jotka määritellään diagonaalien osalta kaavalla  $\sqrt{2} \cdot V_{max}$ .  $V_{max}$  on ristikon tukivoima. Kaavassa käytetty  $\sqrt{2}$  tarkoittaa, että laskettaessa tehdään oletus, että ristikon ensimmäinen diagonaali on 45 asteen kulmassa, jotta alustava sauvavoima saadaan laskettua. Taulukko laskee automaattisesti diagonaalin nurjahduspituuden, jota käytetään kestävyyslaskennassa. Diagonaalit toimivat ristikossa sekä puristettuina että vedettyinä sauvoina, joten puristettujen sauvojen osalta tarkastellaan niiden nurjahdus- ja taivutuskestävyys ja vedettyjen sauvojen osalta niiden vetokestävyys. Taulukko laskee syötettyjen lähtötietojen perusteella diagonaalien kestävyudet ja ilmoittaa käyttöasteet.

### **Aloitustaulukon toimintaohjeet käyttäjälle**

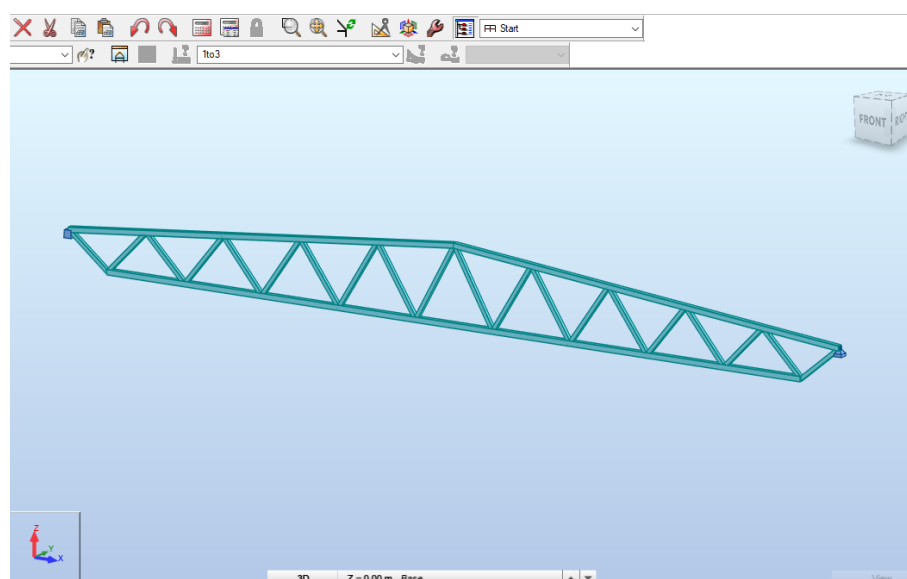
1. Syötä taulukkoon rakennuksen seuraamusluokka (CC1, CC2 tai CC3).
2. Syötä rakennuksen ulkomitat, vapaa korkeus ja kattorakenteiden korkeus.
3. Syötä kuormitusleveys, jänneväli, yläpaarteen aukkojen väli yhdellä lappeella ja haluttu ristikon kokonaiskorkeus ja korkeus tukien alapuolella.
4. Syötä pysyvät kuormat [ $\text{kN/m}^2$ ].
5. Syötä lumikuorman arvo maassa [ $\text{kN/m}^2$ ].
6. Syötä maastoluokka tuulikuormaa varten (0, 1, 2, 3, 4).
7. Syötä ristikon yläpaarteen sivumitat ja seinämäpaksuus.
  - a. Tarkista alustavan mitoituksen käyttöasteet.
    - i. Muuta rakenneputken kokoa, mikäli käyttöasteet ovat yli 100%.
8. Syötä ristikon alapaarteen sivumitat ja seinämäpaksuus.
  - a. Tarkista alustavan mitoituksen käyttöasteet.
    - i. Muuta rakenneputken kokoa, mikäli käyttöasteet ovat yli 100%.
9. Syötä ristikon diagonaalien sivumitat ja seinämäpaksuus.

- a. Tarkista alustavan mitoituksen käyttöasteet.
- i. Muuta rakenneputken kokoa, mikäli käyttöasteet ovat yli 100%.
10. Kun käyttöasteet ovat kaikki alle 100%, siirrä ristikko Robottiin painamalla taulukossa olevaa painiketta.



Kuvio 1. Aloitustaulukon avulla siirretty ristikko Robot Structuralissa

Kuviossa 1 näkyvän ristikon rakenteet on laskettu aloitustaulukkoa käyttäen, jonka jälkeen se on siirretty avointa ohjelmistorajapintaa hyödyntäen Robot Structuraliin, jossa se muodostuu lähtötietojen mukaisena ristikkona sisältäen taulukon laskemat kuormat, joista kuvassa näkyvät pysyvät kuormat. Kuviossa 2 näkyy ristikko, jossa sauvoissa on aloitustaulukossa valitut poikkileikkauskoot.



Kuvio 2. Aloitustaulukon avulla muodostettu ristikko valituilla profiileilla



## 2.3 Ohjelmoinnin perusteet aloitustaulukossa

Ohjelmointi aloitettiin tutustumalla Robotin ohjelmistorajapinnan hyödyntämiseen. Tiedonsiirtoon Excelin ja Robot Structural Analysis -laskentaohjelman välillä käytetään Microsoftin kehittämää ja valmiiksi Excelin kehitystyökaluista löytyvää Virtual Basic for Applications -kehitysalustaa (VBA), jonka avulla koodataan aloitustaulukosta siirrettävät tiedot laskentamallin muodostamiseksi laskentaohjelmaan.

Laskentaohjelman koneelle asentamisen jälkeen VBA:ssa voidaan aktivoida Robotin avoimen ohjelmistorajapinnan koodit, joiden avulla saadaan tiedot liikkumaan ohjelmien välillä. Robotin API-koodien aktivoimisen jälkeen VBA:ssa koodia kirjoittaessa ohjelma antaa ehdotuksia ja esille tulee luettelo, jonka avulla voidaan valita Robottiin muodostettavan objektin koodirivi. (Gawęda & Kosakowski 2015.)

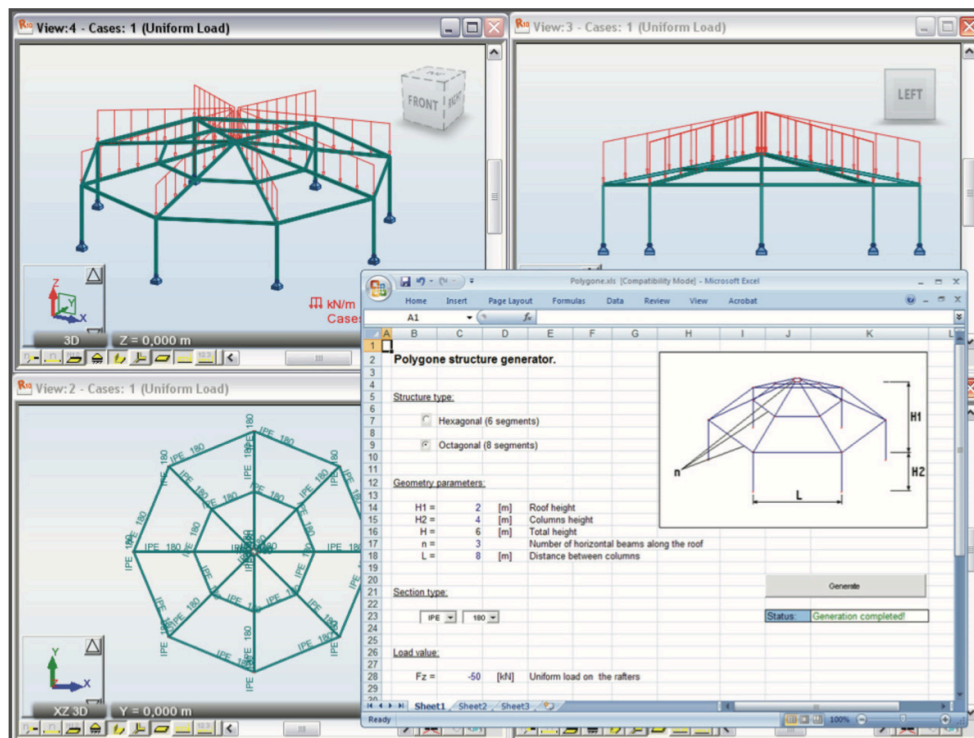
Aloitustaulukosta halutaan siirtää Excelistä Robottiin ristikon sauvojen paikat ja taulukon avulla määritetyt ristikkoon kohdistuvat kuormat sekä valitut poikkileikkauskoot. Ennen koodin kirjoittamisesta täytyi määrittää koordinaatit kyseisille sauvojen paikoille ristikossa ristikon geometriasääntöjen mukaisesti. Tiedonsiirto on ohjelmoitu niin, että koodien avulla Excelistä siirretään koordinaattien tiedot, joiden avulla Robottiin muodostetaan sauvojen paikat. Koodilla saadaan muodostettua sauvat kyseisten koordinaattien välille, jolloin tuloksena on haluttu lähtötietojen mukainen kattoristikko. Tiedonsiirrossa siirretään tiedot myös taulukon avulla muodostetuista kuormista, jotka muodostuvat Robottiin eriteltyinä pysyviin ja muuttuviin kuormiin sekä tuulikuormaan. Viimeisenä koodeilla haetaan käyttäjän määrittämät poikkileikkauskoot ristikon eri sauvoilla ja siirretään ne laskentaohjelmaan, jossa ohjelma lisää ne ohjelman profiililuetteloon ja lisää ne sauvoille automaattisesti. Tiedonsiirtoon käytetty koodi uuden Robot-projektin luomiseen ja poikkileikkauskokojen lisäämiseen Robottiin on liitteenä 6 (salainen). Liitteessä 7 (salainen) on koodi, jota on käytetty eri kuormien hakemiseen taulukosta sekä kuormien muodostamiseen Robotissa.

## 2.4 Ohjelmistorajapinnan hyödyntäminen ja tietojen siirto Robottiin

Asentamalla Robot Structuralin saa samalla pääsyn ohjelman avoimeen ohjelmistorajapintaan eli API:in. API helpottaa ohjelmoijan työtä tarjoamalla mahdollisuuden tehdä rutiinitehtäviä kätevästi automaattisesti ja nopeasti. Robotin API:n avulla käyttäjät voivat tehdä suorittaa analyysimallilla eri tehtäviä, kuten geometrian tekoa ja muokkausta, materiaalien ominaisuuksien muokkausta sekä laskennan suorittamista ja tulosten talteenottoa. Tyypillinen analyysimallin teko sisältää seuraavia vaiheita:

- geometrian mallintaminen
- elementtiverkon säätäminen
- rakenteiden materiaalin ja poikkileikkausten säätäminen
- laskennan suorittaminen ja tulosten analysointi. (Fisher & Sharma n.d, 2.)

Robotin API:n avulla voidaan suorittaa mitä vain yllä mainittuja tehtäviä, mikä vähentää turhia työvaiheita. API käyttää Microsoftin COM-teknologiaa (Component Object Model). COM-teknologia mahdollistaa käyttäjälleen mahdollisuuden kirjoittaa koodia VBA:ssa, jota käyttäen saadaan pääsy moniin ohjelmiin, kuten Exceliin, Wordiin ja AutoCADIin. Automatisoinnin kautta saavutetaan monia hyötyjä: suunnitteluun käytettävä aika vähenee, tarkkuus ja tehokkuus lisääntyvät, toistuvia vaiheita ei tarvitse tehdä. Yhteenvetona, kaikki hyödyt näkyvät tehostuneena työskentelytehona. (Fisher & Sharma n.d, 2-3.) Alla olevasta kuviosta 3 nähdään, kuinka Excelin lähtötietojen perusteella saadaan API:a hyödyntäen muodostettua Robottiin haluttu rakenne, jossa on valmiina geometria, kuormat, tukien rakenne ja profiilikoot.



Kuvio 3. Esimerkki API:n hyödyntämisestä Excelin ja Robotin välillä (Fisher & Sharma n.d, 2.)

Aloitustaulukon profiilien alustavan mitoituksen jälkeen kattoristikko siirretään Robot Structural Analysis -ohjelmaan, jossa saadaan laskettua tarkasti ristikolle tulevat rasitukset ja kuormien vaikutukset. Excel-taulukko tekee alustavan mitoituksen rakenteille alustavien sauvavoimien avulla, jotka voivat erota todellisista ristikossa vallitsevista voimista joissain tapauksissa. Laskentamallin muodostamisella ja kattoristikon laskemisella Robotissa varmistetaan, että alustavalla mitoituksella saadut profiilit kestävät. Mikäli voimat ovat liian suuria rakenteelle eikä se kestä, saadaan se selville Robotin avulla ja paarteiden kokoa voidaan muuttaa ohjelmassa.

### **3 Suunnitteluperusteet ja teräsrakenteiden mitoitus**

Rakenteiden mitoitukseen liittyy monia vaatimuksia, joita suunnittelijan tulee noudattaa. Rakenne on suunniteltava ja toteutettava niin, että sen luotettavuustaso pysyy suunniteltuna koko käyttöikänsä ajan. Rakenteen tulee kestää siihen kohdistuvat kuormat ja vaikutukset sekä säilytettävä toimivuutensa sille asetetussa käyttötarkoituksessa. Rakenteen on kestävä tulipalotilanteessa sille suunnitellun ajanjakson ajan. (RIL 201-1-2017, 25.)

Onnettomuustilanteessa rakennuksen on kestävä siihen kohdistuvat voimat ilman suhteettoman laajoja vaurioita. Suunnittelussa äkilliset onnettomuustilanteet otetaan huomioon tekemällä rakenneratkaisuja, joilla voidaan estää tai vähentää vaaratilanteita ja niiden vaikutuksia. (Mts, 25.)

#### **3.1 Suunnitteluperusteet**

##### **Suunnitteluperusteiden sisältö teräsrakennesuunnittelussa**

Teräsrakenteiden suunnitteluperusteet perustuvat käytettävän materiaalin ominaisuuksiin, sen lujuus- ja laatuokkaan, rajatilamitoitukseen, sisäisten voimien ja momenttien laskentaan sekä poikkileikkausten tarkasteluun rakennelaskelmissa. Rajatilamitoituksessa käydään läpi rakenteiden käyttörajatila ja murtorajatila osavarmuuslukuineen, taipumien raja-arvot, kuormien mitoitusarvot ja rakenteen siirtymätilan vaikutukset. (Kaitila 2014, 26.)

##### **Teräsrakenteiden suunnittelu**

Suunniteltaessa teräsrakenteita rakennesuunnittelun tärkeimpiä osa-alueita ovat rakennuksen rungon määrittäminen, liikuntasauvojen paikkojen sijoitus, rakenneosien mitoittaminen, liitokset, jäykistäminen, pintakäsittely ja korroosion estäminen rakenteissa. Suunnitteluvaiheessa asetetut taloudelliset ja toiminnalliset tavoitteet ohjaavat runkojärjestelmän valintaa. Rungon valintaa tehdessä on huomioitava ympäröivät olosuhteet, rakentamisaikataulu, osien valmistus, niiden kuljetus ja asennustyöt.

Erityisesti teräsrakenteissa liitokset ovat tärkeässä osassa, koska ne muodostavat huomattavan osan suunnittelu- ja valmistustyöstä. Liitosten toiminta ja muotoilu vaikuttavat niiden jäykkyyteen, jolla on vaikutusta voimasuureiden jakautumiseen ja rakenteen toimivuuteen ja kustannuksiin. (Kaitila 2014, 27.)

### **Seuraamusluokat**

Tärkeä osa rakenteiden suunnittelua on seuraamusluokan määrittäminen. Suunnittelun vaativuusluokka ja seuraamusten vakavuus perustuvat rakennuksen käyttötarkoitukseen, sen sijaintiin ja ympäristöön, rakenteiden mittasuhteisiin ja niiden käyttäytymiseen. Jokaisen rakennuksen seuraamusluokka arvioidaan tapauskohtaisesti. Seuraamukset voivat olla myös erilaiset rakennuksen eri osissa. (Rakenteiden lujuus ja vakaus 2016, 8.)

Seuraamusluokkia on kolme: CC1, CC2 ja CC3. Seuraamusluokka määräytyy seuraamusten vakavuuden perusteella. Taulukosta 1 nähdään, että seuraamusluokat perustuvat rakennuksen aiheuttamiin seuraamuksiin henkilö-, talous-, ympäristö- tai sosiaalisten vahinkojen osalta. Rakennuksen seuraamusluokka on CC1, mikäli seuraamusten vakavuus on vähäinen tai merkityksetön. Seuraamusluokkaa CC3 käytetään rakennuksissa, joilla seuraamusten vakavuus voi aiheuttaa suuret vaikutukset. CC2-luokkaa käytetään, mikäli rakennus ei kuulu kumpaakaan edellä mainittuun luokkaan. Rakennuksen seuraamusluokka määrittää kuormakertoimen  $K_{FI}$ , jolla kerrotaan rakennuksen epäedulliset kuormat, luokassa CC1  $K_{FI}=0,9$ , luokassa CC2  $K_{FI}=1,0$  ja luokassa CC3  $K_{FI}=1,1$ . (RIL 201-1-2017, 26.)

Taulukko 1. Seuraamusluokkien ja kuormakertoimien määräytyminen (RIL 201-1-2017, 26.)

Seuraamusluokan (CC) kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä	Luotettavuusluokka/kuormakerroin $K_{FI}$
CC3 Suuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai hyvin suurten taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	Rakennuksen kantava runko <sup>1)</sup> jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä, kuten - yli 8-kerroksiset <sup>2)</sup> asuin-, konttori- ja liikerakennukset - konserttisalit, teatterit, urheilu- ja näytelyhallit, katsomot - raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset. Erikoisrakenteet, kuten esim. korkeat tornit. Luiskat sekä penkereet ja muut rakenteet, jotka sijaitsevat siirtymien haittavaikutuksille herkissä ympäristöissä erityisesti hienorakeisten maalajien alueilla.	RC3 $K_{FI} = 1,1$
CC2 Keskisuuret seuraamukset ihmishenkien menetysten tai merkittävien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia. .	Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1.	RC2 $K_{FI} = 1,0$
CC1 Vähäiset seuraamukset ihmishenkien menetysten tai pienten tai merkityksettömien taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	1- ja 2-kerroksiset <sup>2)</sup> rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä <sup>3)</sup> , kuten esim. pienehköt varastot ja maatalouden tuotantorakennukset, joiden pinta-ala on enintään 300 m <sup>2</sup> tai suurin jänneväli enenintään 6 metriä. Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa, kuten - matalalla olevat alapohjat, ilman kellaritiloja - ryömintätilaiset vesikatot, kun yläpohja on varsinainen kantava rakenne - sellaiset ulko- ja väliseinät, ikkunat, ovet ja vastaavat, joihin pääasiassa kohdistuu ilman paine-eroista aiheutuva sivuttaiskuormitus ja jotka eivät toimi kantavan tai jäykistävän rungon osana.	RC1 $K_{FI} = 0,9$

Taulukkoon 2.0S liittyviä huomautuksia:

<sup>1)</sup> pienehköt rakennusrungosta erilliset välipohjat kuuluvat kuitenkin luokkaan CC2, elleivät ne toimi koko rakennusta jäykistävänä rakenteena.

<sup>2)</sup> kellarikerrokset mukaan luettuina.

<sup>3)</sup> tilapäisenä oleskeluna pidetään päivittäistä käymistä rakennuksessa, mutta ei siellä pitämää viipymistä.

## 3.2 Kuormien määrittäminen

### 3.2.1 Kuormien määritys

Teräsrakenteiseen halliin kohdistuvat kuormat muodostuvat tässä opinnäytetyössä käsiteltävässä esimerkissä rakenteiden omapainosta sekä lumi- ja tuulikuormasta. Omapainot käsittävät pilarien, yläpohjarakenteen, ripustuskuormien ja ristikoiden painot, lumi- ja tuulikuormat lasketaan RIL 201-1-2017 mukaan. Liitteissä 1 ja 2 lasketaan kuormat ja kuormitusyhdistelmät pilarin mitoituskuormaksi.

### 3.2.2 Tuulikuorman laskeminen

Tuulen puuskanopeuspaine perustuu modifioimattomaan tuulennopeuden perusarvoon  $v_b=21$  m/s, joka on sama koko Suomen alueella. Lähtökohtana tuulen aiheuttaman paineen laskentaan on tuulenpaineen ominaisarvo  $q_{p0}(z)$ , joka määritetään rakennuksen korkeuden ja maastoluokan mukaan. Tällä tavalla laskettuna ominaisarvoon ei oteta mukaan maaston paikallisen pinnanmuodon vaikutuksia. (RIL 201-1-2017, 136.)

Rakennukseen kohdistuva tuulen voima määräytyy rakennusta ympäröivän maaston mukaan. Eurokoodin 1991-1-4 liitteessä A maastoluokat luokitellaan neljään eri luokkaan (0-IV) niiden rosoisuuden mukaan. Rakennusta ympäröivä maasto vaikuttaa tuulen nopeuteen, joka kohdistuu rakennukseen. Mikäli rakennus sijaitsee kahden maastoluokan muutoskohdan lähellä, täytyy EN 1991-1-4 liitteen A.2 mukaan käyttää sileämmän maastoluokan tuuliarvoja, jos rakennus on:

- Alle 2 km:n päässä maastoluokkaan 0 kuuluvasta sileämmästä maastosta
  - Alle 1 km:n päässä maastoluokkiin I, II tai III kuuluvasta sileämmästä maastosta.
- (RIL 201-1-2017, 130.)

Kuviosta 4 nähdään, kuinka maastoluokat määräytyvät rakennusta ympäröivän maastoluokan mukaan. Maastoluokat vaikuttavat tuulen puuskanopeuspaineeseen, joka määräytyy rakennuksen korkeuden ja maastoluokan mukaan.



Kuvio 4. Maastoluokat 0-IV (RIL 201-1-2017, 131.)

### Tuulenpaineen laskeminen

Rakennukseen kohdistuva tuulenpaine voidaan määrittää kahdella eri tavalla: voimakertoimen  $c_f$  avulla tai ulkopuolisten ja sisäpuolisten tuulenpaineiden kertoimien avulla. Voimakertoimen  $c_f$  avulla laskettuna saadaan tuulenpaineen kokonaisvoima tietylle rakennuksen osalle sen pinta-alan mukaan. Ulkopuolisten ja sisäpuolisten pai-



nekertoimien avulla voidaan määrittää tarkasti rakennuksen tiettyyn osaan kohdistuvat tuulennopeuksien arvot esimerkiksi rakennuksen nurkka-alueilla tai kattoalueella katon muodon mukaan. (Mts, 138-140.)

### **Tuulenpaineen määrittäminen voimakertoimen avulla**

Rakennuksen korkeuden ollessa pienempi kuin sen leveys, voidaan tehdä oletus, että tuulenpaine on sama joka korkeudessa sama kuin rakennuksen harjalla oleva tuulenpaine. (RIL 201-1-2017, 140.) Rakennukseen kohdistuva kokonaistuulivoima lasketaan seuraavalla kaavalla 1:

$$F_w = c_s c_d c_f q_p(h) * A_{ref}, \text{ missä} \quad (1)$$

$F_w$  = kokonaistuulivoima (kN)

$c_s c_d$  = rakennekerroin

$c_f$  = voimakerroin

$q_p(h)$  = modifioitu nopeuspaine harjan korkeudella

$A_{ref}$  = tuulikuorman vaikutusala

### **Tuulenpaineen laskeminen osapaineiden avulla**

Osapaineiden avulla laskettu tuulenpaine pätee laskettaessa pintoja, jotka toimivat jäykistävinä rakenteina estäen tuulen aiheuttamat resonanssivärähtelyt. Mikäli tutkittavan pinnan, kuten ulkoseinän tai sen kerroksen alin ominaistajuus on alle 5 Hz, täytyy värähtelyt ottaa huomioon laskennassa ja tällöin tässä esitettävä laskentatapa ei enää päde. (Mts, 138.)

Rakennuksen ulkopintoihin kohdistuva tuulenpaine  $w_e$  lasketaan kaavan 2 mukaisesti seuraavasti:

$$w_e = q_p(z_e) c_{pe}, \text{ missä} \quad (2)$$

$w_e$ = tiettyyn pintaan kohdistuva pinta korkeudella  $z_e$

$q_p(z_e)$ = puuskanopeuspaine

$c_{pe}$ = ulkoisen paineen kerroin

$z_e$ = nopeuspainekorkeus ulkoiselle paineelle.

Rakenteen sisäpintoihin kohdistuva tuulenpaine  $w_i$  lasketaan kaavan 3 mukaisesti seuraavasti:

$$w_i = q_p(z_i) c_{pi}, \text{ missä} \quad (3)$$

$q_p(z_i)$ = puuskanopeuspaine

$c_{pi}$ = sisäisen paineen kerroin

$z_i$ = nopeuspainekorkeus sisäiselle paineelle.

Seinään tai elementtiin kohdistuva tuulen nettopaine lasketaan sisä- ja ulkopuolisten paineiden erotuksena. Laskemisessa tulee huomioida, ovatko paineet imua vai painetta eli kohdistuvatko ne pintaan vai siitä poispäin. (Mts, 139.)

### 3.2.3 Lumikuorman laskeminen

Lumikuorman arvoon katolla vaikuttavat muun muassa seuraavat tekijät: katon muoto, pinnan karheus, viereiset rakennukset, rakennusta ympäröivä maasto ja ilmasto-olosuhteet (RIL 201-1-2017, 100). Lumikuorman arvo maassa esimerkkihallin sijaintipaikkakunnalla Haminassa on  $2,75 \text{ kN/m}^2$ . Rakenteita mitoittaessa maassa olevan lumikuorman arvoa voidaan pienentää laskemalla lumikuorman arvo katolla. Liitteessä 1 lasketaan lumikuorman arvo katolla esimerkkikohteelle.

Katon lumikuorman  $s$  määrittäminen kaavan 4 mukaisesti:

$$s = \mu_i * C_e * C_t * s_k, \text{ missä} \quad (4)$$

$\mu_i$  = muotokerroin lumikuormalle

$C_e$  = tuulensuojaiskerroin

$C_t$  = lämpökerroin, jonka arvona käytetään yleensä 1,0

$s_k$  = lumikuorman neliökuorma maassa rakennuksen sijaintipaikalla [ $\text{kN/m}^2$ ].

Muotokerroin  $\mu_i$  määritetään RIL 201-1-2017 taulukon 5.2 mukaan. Kertoimen arvo riippuu katon kaltevuuskulmasta  $\alpha$ . Kulman ollessa  $0^\circ \leq \alpha \leq 30^\circ$ ,  $\mu_1$  ja  $\mu_2 = 0,8$ . Kulman ollessa  $30^\circ < \alpha < 60^\circ$ , kertoimet  $\mu_1$  ja  $\mu_2$  lasketaan kaavalla  $0,8(60-\alpha)/30$ . Jos kulma  $\alpha > 60^\circ$ , käytetään  $\mu_1$  ja  $\mu_2$  arvona 0,0. Mikäli katolla käytetään lumiestettä tai muuta vastaavaa,  $\mu_2 \geq 0,8$ . (Mts. 102.)

Alla olevan taulukon 2 mukaisesti tuulensuojaiskerroin  $C_e$  muodostuu rakennusta ympäröivän maastotyyppin mukaan. Maastotyyppin ollessa tuulinen, käytetään kertoimen  $C_e$  arvona 0,8, poikkeuksena rakennuksen, joiden lyhyempi sivumitta on  $> 50$  m, jolloin kertoimen arvona käytetään 1,0. Maastotyyppin ollessa normaali, on  $C_e$  1,0 ja suojaisassa maastossa kertoimen  $C_e$  arvona käytetään 1,2. Tuulinen maasto on taulukon mukaan laakea ja esteetön, joka ei tarjoa suojaa rakennukselle. Normaaliksi maastoksi kutsutaan aluetta, jossa tuuli ei merkittävästi poista lunta katolta. Suojainen maasto on ympäröivää maastoa alempana tai korkeiden puiden tai rakennusten ympäröimä. (Mts, 100.)

Taulukko 2. Tuulensuojaisuuskertoimen  $C_e$  muodostuminen (RIL 201-1-2017, 100.)

Maastotyyppi	$C_e$
Tuulinen	0,8 ( $\geq 1,0$ , mikäli lyhyempi sivumitta > 50 m)
Normaali	1,0
Suojainen	1,2

Tuulinen maasto: laakea, esteetön, joka puolelle avoin alue, jolloin maasto, korkeat rakennuskohteet tai puut eivät suo-  
jaa tai suojaavat vain vähän.

Normaali maasto: alue, jolla rakennuskohteeseen vaikuttava tuuli ei maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden ta-  
kia huomattavasti poista lunta.

Suojainen maasto: alue, jolla tarkasteltava rakennuskohde on huomattavasti alempana kuin ympäröivä maasto tai se on  
korkeiden puiden tai itseään korkeampien rakennuskohteiden ympäröimä.

Lumikuorman määrittämisessä saa käyttää kansallista valintaa. Katon lumikuorman määrittämisessä tulee ottaa huomioon tuulensuojaisuuskertoimen korotuskerroin, mikäli kyseessä on rakennus, jonka lyhyemmän sivun pituus on vähintään 50 metriä. (RIL 201-1-2017, 115-117.) Taulukosta 3 nähdään, kuinka korotuskerroin määritetään rakennuksen sivujen suhteen mukaan.

Taulukko 3. Korotuskertoimet lumikuorman määrittämiseen rakennuksille, jonka lyhyempi sivu on vähintään 50 m pitkä (RIL 201-1-2017, 117.)

Lyhyt sivu (m)	Pitkän sivun suhde lyhyeen sivuun	
	1	2
50	1,0	1,1
75	1,1	1,2
100	1,2	1,25

### 3.3 Teräsristikkokehän mitoitus

#### 3.3.1 Käsitteitä

$K_{FI}$  on seuraamusluokan mukainen kuormakerroin

$\psi_i$  on kyseisen kuorman yhdistelykerroin

$f_y$  on teräksen lujuusluokan mukainen myötölujuus [ $N/mm^2$ ]

$I$  on poikkileikkauksen neliömomentti [ $mm^4$ ]

$W$  on poikkileikkauksen taivutusvastus [ $mm^3$ ]

$\gamma$  on kuorman osavarmuusluku

$E$  on materiaalin kimmokerroin [ $N/mm^2$ ]

$G$  on materiaalin liukukerroin [ $N/mm^2$ ]

### 3.3.2 Pilarien mitoitus

#### Kuormitusyhdistelmät

Kuormien määrittämisen jälkeen mitoitetaan pilarit. Muodostetaan pilarin mitoitus varten murtorajatilán kuormitusyhdistelmät RIL 201-1-2017 mukaan. Käytetään kuormina vesikaton rakenteiden painoa  $G_{k,1}$ , pilarin omapainoa  $G_{k,2}$ , tuulikuormaa  $Q_{ks}$  ja lumikuormaa  $Q_{kw}$ . Hallissa ei ole välipohjaa, joten välipohjan omapainoa  $G_{k,3}$  ja varastokuormaa  $Q_k$  ei oteta huomioon tässä tapauksessa. Pilarien mitoituksessa tarkastellaan vähintään kolmea eri kuormitusyhdistelmää: muuttuvat kuormat erikseen sekä omapainot erikseen. Pilarin mitoitus käydään läpi liitteessä 3. Kuormitusyhdistelmät pilarien mitoitukseen muodostetaan seuraavasti:

Kuormitusyhdistelmä 1 lasketaan kaavalla 5, kun kuormina rakenteiden omapainot:

$$p_d = 1,35 \cdot K_{FI} \cdot (G_{k,1} + G_{k,2}) \quad (5)$$

Kuormitusyhdistelmä 2 lasketaan kaavalla 6, kun muuttuvana kuormana lumikuorma:

$$p_d = 1,15 \cdot K_{FI} \cdot (G_{k,1} + G_{k,2}) + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{ks} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot (\psi_0 \cdot Q_{kw}) \quad (6)$$

Kuormitusyhdistelmä 3 lasketaan kaavalla 7, kun muuttuvana kuormana tuulikuorma:

$$p_d = 1,15 \cdot K_{FI} \cdot (G_{k,1} + G_{k,2}) + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{kw} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot (\psi_0 \cdot Q_{ks}). \quad (7)$$

#### Pilarin nurjahduspituus

Kehärakenteissa pilarien nurjahduspituutta laskettaessa voidaan käyttää hyväksi jäykistävää vaikutusta, jonka palkit aiheuttavat. Kehärakenteissa liitokset ovat jäykkiä ja nurjahduspituuteen vaikuttaa myös se, miten kehä on tuettu sivuttaissuunnassa. Kehärakenne voidaan luokitella joko sivusiirtyväksi tai sivusiirtymättömäksi, joista sivusiirtymätön rakenne on usein jäykistetty rakenteilla tai tuettu jäykällä rakenneosilla, esimerkiksi porrashuoneella tai hissikuilulla. (Ongelin & Valkonen 2016, 400.)



### Pilarin puristuskestävyys

Pilarin puristuskestävyys lasketaan kaavalla 9. Mitoitusehto puristukselle on kaavassa 8:

$$N_{Ed} \leq N_{c,Rd} \text{ missä} \quad (8)$$

$N_{Ed}$ =puristusvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

$$N_{c,Rd} = (A * f_y) / \gamma_{M1} \text{ (PL-luokat 1-3)} \quad (9)$$

### Pilarin taivutuskestävyys

Mitoitusehto taivutuskestävyydelle on kaavassa 10. Taivutuskestävyys poikkileikkaukselle lasketaan kaavalla 11.

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd}, \text{ missä} \quad (10)$$

$M_{Ed}$ =taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} * f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ missä} \quad (11)$$

$W_{el}$ =poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen taivutusvastus

### Pilarin leikkauskestävyys

Mitoitusehto leikkauskestävyydelle näkyy kaavassa 12:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}, \text{ missä} \quad (12)$$

$V_{Ed}$ =leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

Tarkastetaan ehto, tarvitseeko poikkileikkaukselle laskea leikkauslommahduskestävyyttä. Mikäli kaavassa 13 oleva ehto täyttyy, lasketaan leikkauskestävyys kaavan 15



mukaisesti. Mikäli kaavassa 14 oleva ehto toteutuu, lasketaan leikkauslommahdukskestävyys kaavalla 17. Poikkileikkauksen leikkauspinta-ala lasketaan kaavalla 16.

$$\frac{h}{t} \leq \frac{72 * \varepsilon}{\eta} + 3 \quad (13)$$

$$\frac{h}{t} > \frac{72 * \varepsilon}{\eta} + 3 \quad (14)$$

$$V_{pl.Rd} = A_v * \frac{f_y}{\gamma_{M0}}, \text{ missä} \quad (15)$$

$A_v$  on leikkauspinta-ala

$$A_v = A \frac{h}{b+h} \quad (16)$$

$$V_{pl.Rd} = A_v * \frac{\chi_w * f_y}{\sqrt{3} * \gamma_{M1}}, \text{ missä} \quad (17)$$

$\chi_w$  on uuman osuuden pienennystekijä

$\chi_w$  määritetään uuman muunnetun hoikkuuden  $\bar{\lambda}_w$  avulla taulukosta 5. Taulukkoon tarvittava  $\bar{\lambda}_w$  lasketaan kaavojen 18 ja 19 avulla.

Taulukko 5. Pienennystekijän  $\chi_w$  määrittäminen (Ongelin & Valkonen 2016, 105.)

$\bar{\lambda}_w < 0,83$	1,00
$0,83 \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1,08$	$0,83 / \bar{\lambda}_w$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{\bar{b}/t}{86,4 * \varepsilon} = \frac{(h-3t)/t}{86,4 * \varepsilon}, \text{ missä} \quad (18)$$

$$\varepsilon = \sqrt{235 N/mm^2 / f_y} \quad (19)$$

### Pilarin nurjahdukskestävyys

Mitoitusehto puristetulle sauvalle näkyy kaavassa 20:

$$N_{Ed} \leq N_{b.Rd}, \text{ missä} \quad (20)$$

$N_{Ed}$  on aksiaalisesti puristetun sauvan puristusvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

$N_{b,Rd}$  on nurjahduskestävyyden mitoitusarvo aksiaalisesti puristetulle sauvalle

Nurjahduskestävyys lasketaan seuraavalla kaavalla 21. Kaavaan tarvittavat luvut lasketaan kaavojen 22-25 avulla.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \text{ poikkileikkausluokille 1,2 ja 3 (myös pyöreät putket)} \quad (21)$$

$$\chi, \text{ kun } \bar{\lambda} > 0,2 = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}}; \text{ jos } \bar{\lambda} \leq 0,2 \rightarrow \chi = 1 \quad (22)$$

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \quad (23)$$

$\alpha$ =epätarkkuustekijä nurjahduskäyrästä

$$\bar{\lambda} = \sqrt{(A * f_y) / N_{cr}} \text{ (PL-luokat 1-3)} \quad (24)$$

$$N_{cr} = (\pi^2 * EI) / L^2 cr \quad (25)$$

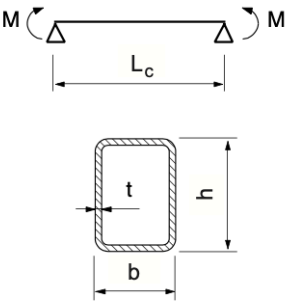
$L_{cr}$  on nurjahduspituus

### **Pilarin kiepahduskestävyys**

Rakenneputkilla on hyvä kiepahduskestävyys verrattuna avoimiin poikkileikkauksiin. Suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla voi kiepahduskestävyys tulla mitoittavaksi, mikäli pituus-leveys-suhde on pieni ja rakenneputki on pitkä. (Ongelin & Valkonen 2016, 90.)

Kiepahduskestävyyttä ei kuitenkaan aina tarvitse laskea suorakaiteen muotoisille rakenneputkille. Taulukon 6 mukaisesti kiepahduskestävyyttä ei tarvitse laskea, mikäli poikkileikkauksen b-t/h-t -suhde alittaa tuentavälin  $L_c$  raja-arvon kyseessä olevalla lujuusluokalla. Taulukon 6 raja-arvot pätevät poikkileikkausluokkaan 3, poikkileikkausluokkien 1-2 raja-arvot voidaan laskea taulukossa näkyvällä kaavalla.

Taulukko 6. Raja-arvot suorakaideputkille, jolloin kiepahduskestävyyttä ei tarvitse laskea. (Ongelin & Valkonen 2016, 97.)

	$\frac{b-t}{h-t}$	$\frac{L_c}{h-t}$				
		S235	S275	S355	S420	S460
	0,25	27,8	23,8	<b>18,4</b>	<b>15,6</b>	14,2
	0,33	41,8	35,8	<b>27,7</b>	<b>23,4</b>	21,4
	0,40	54,8	46,8	<b>36,3</b>	<b>30,6</b>	28,0
	0,50	73,8	63,1	<b>48,9</b>	<b>41,3</b>	37,7
	0,60	93,2	79,6	<b>61,7</b>	<b>52,1</b>	47,6
	0,70	112,7	96,3	<b>74,6</b>	<b>63,0</b>	57,6
	0,80	132,2	112,9	<b>87,5</b>	<b>73,9</b>	67,5
	0,90	151,5	129,5	<b>100,3</b>	<b>84,8</b>	77,4
	1,00 <sup>a)</sup>	170,8	146,0	<b>113,1</b>	<b>95,6</b>	87,3

a) EN 1993-1-1 mukaan nelion muotoisilla rakenneputkilla ei ole kiepahdusvaaraa.

Taulukon arvot on määritetty haarukkatuetulle sauvalle käyttämällä varmalla puolella olevaa tehollisen pituuden kerrointa  $k = 1,0$ .  
Lisäksi on oletettu, että sauvaan kohdistuu vakiomomentti joka on kiepahduksen kannalta kuormituksista määräävin.  
Poikkileikkausluokille 1 ja 2 raja-arvot saadaan kertomalla taulukon arvot suhteella  $W_{el,y} / W_{pl,y}$ .

Mitoitusehto taivutetulle sauvalle kiepahdukselle näkyy kaavassa 26:

$$M_{Ed} \leq M_{b,Rd}, \text{ missä} \quad (26)$$

$M_{Ed}$  on taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa

$M_{b,Rd}$  on kiepahduskestävyyden mitoitusarvo

Kiepahduskestävyys lasketaan seuraavalla kaavalla 27. Kaavaan tarvittavat arvot lasketaan kaavojen 28-31 mukaan.

$$M_{b,Rd} = W_y * \frac{\chi_{LT} * f_y}{\gamma_{M1}}, \text{ missä} \quad (27)$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta * \bar{\lambda}_{LT}^{-2}}}, \text{ mutta } \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1,0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1,0}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases} \quad (28)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2] \quad (29)$$

$\alpha_{LT}$  on kiepahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä

Ongelinin ja Valkosen (2016, 92) mukaan Suomen kansallisessa liitteessä standardissa EN 1993-1-1 kylmämuovatuille rakenneputkille käytetään  $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$  ja  $\beta=0,75$ .

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y * f_y}{M_{cr}}} \quad (30)$$

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 * EI_z}{(kL)^2} \left[ \sqrt{\frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 * EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right], \text{ missä} \quad (31)$$

$C_1$  ja  $C_2$  ovat kuormituksesta riippuvia vakioita

$L$  on kiepahdustukien väli

$I_t$  on vääntöneliömomentti

$k$  on sauvan päiden tuennasta riippuva kerroin

$z_g$  on kuorman vaikutusalueesta johtuva luku

### Yhteisvaikutusehto taivutukselle ja puristukselle

Yhteisvaikutuskaavat taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen kuormittamille sauvoille ovat kaavoissa 32 ja 33:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} * \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} * \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0 \quad (32)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} * \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0, \text{ missä} \quad (33)$$

$N_{Ed}$ ,  $M_{y.Ed}$  ja  $M_{z.Ed}$  ovat mitoitusarvot sauvojen puristusvoimalle ja maksimimomentille

$\Delta M_{y.Ed}$  ja  $\Delta M_{z.Ed}$  ovat neutraaliakselin siirtymisestä aiheutuvat momentit

$N_{Rk}$ ,  $M_{y.Rk}$  ja  $M_{z.Rk}$  ovat PL-luokan mukaiset ominaisarvot puristus- ja taivutuskestävyyksille

$\chi_y$  ja  $\chi_z$  ovat taivutusnurjahduksen pienennystekijöitä

$k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$  ja  $k_{zz}$  ovat yhteisvaikutustekijöitä

### 3.3.3 Kattoristikon mitoitus

Ristikon suunnittelussa käytetään yleensä avuksi laskentaohjelmia, joilla ristikon eri osien poikkileikkaukset saadaan laskettua tarkasti. Ristikon suunnittelu aloitetaan kuormien määrittämisestä. Seuraavana määritetään ristikon korkeus, josta siirrytään alustavien sauvavoimien laskentaan. Sauvavoimien laskennan jälkeen ristikko lasketaan laskentaohjelmalla, jolla voidaan myös määrittää ristikon liitokset ja hitsit. Ristikon taipumaa verrataan sallittuun arvoon ja lopuksi suunnitellaan ristikon tukeminen poikittaissuunnassa sekä orsien liitokset ristikkoon. (Ongelin & Valkonen 2016, 424-426.)

Ristikon sauvojen poikkileikkauskokoihin vaikuttavat suuresti nurjahduspituudet. Neliön muotoisilla putkiprofiileilla nurjahduspituudet ovat melkein samat molempiin suuntiin, joten ne ovat kaikkein edullisimpia. Mikäli nurjahduspituudet eri suuntiin eroavat suuresti toisistaan, voidaan käyttää suorakaiteen muotoista profiilia. Leikkauskestävyyden ja paarteen pinnan paikallisen lujuuden heikkenemisen vuoksi leveitä ja matalia paarteita ei kannata käyttää. (Mts, 429.)

#### Ylä- ja alapaarteiden mitoitus

Alustava sauvavoima ylä- ja alapaarteelle lasketaan seuraavasti kaavalla 34:

$$N_{0.Ed} \approx \frac{q_d * L^2}{8H}, \text{ missä} \quad (34)$$

$q_d$ =kuormat murtorajatilassa

$L$ =ristikon pituus

$H$ =ristikon korkeus

Yläpaarteen osalta täytyy tarkastella yllä olevien kaavojen mukaisesti sen nurjahdus- ja taivutuskestävyyttä. Jos tarkasteltava poikkileikkaus on suorakaiteen muotoinen, tarkastellaan lisäksi kiepahduskestävyys. Neliön muotoisilla rakenneputkilla ei ole

kiepahdusvaaraa. Alapäärre on vedetty, joten tarkastellaan sen vetokestävyyttä kaavalla 35:

$$N_{t.Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (35)$$

Nurjahduspituuden laskenta paarteelle

Putkipalkkiristikossa nurjahduspituutena  $L$  käytetään uumasauvojen solmuväliä, kun kyseessä on tasoa vastaan tapahtuva nurjahdus. Tasoa vastaan tapahtuvassa nurjahduksessa nurjahduspituutena  $L$  käytetään paarteen poikittaisten tukien etäisyyttä. Nurjahduspituus  $L_{cr}$  lasketaan näin ollen  $0,9 \cdot L$  sekä ristikon tasossa ja tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa tapahtuvassa nurjahduksessa. (Mts, 429-430.)

### Diagonaalit

Diagonaalien profiilikoko on suositeltavaa valita niin, että sen leveyden suhde paarteen leveyteen on 0,7-0,8. Tällöin sauvojen hitsaaminen onnistuu. Uumasauvojen osalta ohutseinäinen profiili on edullinen hitsaamisen kannalta. Ohutseinäinen ja mitoiltaan suuri uumasauva on myös kestävyydeltään parempi ja lujempi liitoksissa. (Mts, 431.)

Alustava sauvavoima diagonaaleille lasketaan seuraavasti kaavalla 36:

$$N_{i.Ed} \approx 0,5 \cdot q_d \cdot L\sqrt{2} \quad (36)$$

Diagonaalit ovat puristettuja ja vedettyjä sauvoja, joten niiden osalta täytyy tarkastella niiden vetokestävyyttä sekä nurjahduskestävyyttä.

### Nurjahduspituuden laskenta diagonaaleille

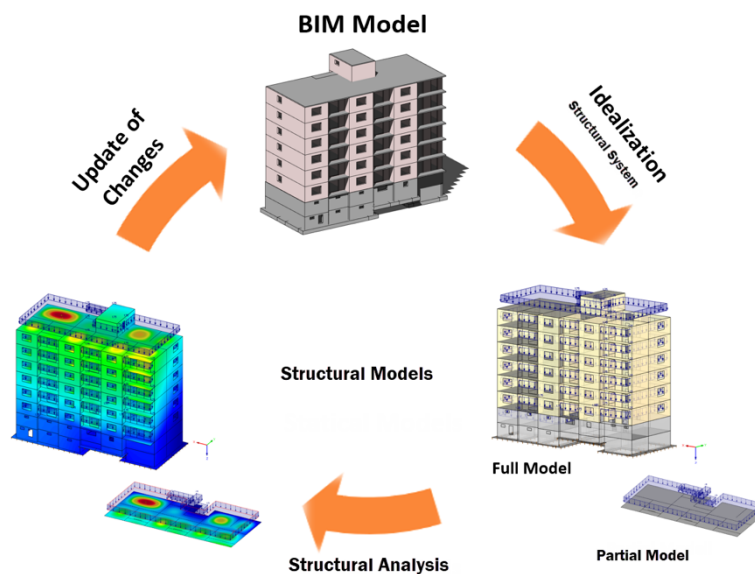
Putkipalkkiristikon mitoituksessa voidaan tehdä varmalla puolella oleva oletus, että uumasauvan nurjahduspituus on sauvan solmupisteväli. Ongelinin ja Valkosen (2016, 431) mukaan standardin EN 1993-1-1 mukaan kaikilta sivuiltaan hitsatulla liitoksella on jäykkyyttä, jolloin nurjahduspituus uumasauvoille voidaan laskea kaavalla  $L_{cr}=0,75 \cdot L$ . (Mts, 431.)

## 4 Tiedonsiirto-ohjelmien kuvaus

### 4.1 Tiedonsiirto tietomallin ja rakennemallin välillä

Tietomallit sisältävät tietoa rakennuksen geometriasta, materiaaleista ja rakenteista. Tietomallissa olevat rakenteet eivät aina ole lopullisessa koossaan, vaan niillä kuvailaan rakenteen toimintaa. Rakenteen toimivuuden kuvauksen lisäksi mallinnettujen rakenteiden avulla saadaan arviota rakenteiden painosta ja kustannuksista. Mallinnuksella halutaan myös välttää suunnitteluvirheitä, joita ovat esimerkiksi rakenteiden törmäykset. Rakenneanalyysissä keskitytään rakenteen toimivuuteen. Pilarit ja palkit lasketaan sauvaelementteinä ja laatat sekä seinät lasketaan laattaelementteinä. Rakenneanalyysissä keskitytään tukireaktioihin, materiaalien ominaisuuksiin, kuormiin, rakennuksen liikkeiden määrittämiseen, suunnittelumääräyksiin sekä eri laskentamenetelmiin. (Rustler 2017.)

Kuviosta 5 nähdään, miten tiedonsiirtoa tietomallin ja rakennemallin välillä hyödynnetään rakennusprojekteissa. Tietomallin avulla saadaan havainnollistettua rakennuksen geometria ja sen rakenteen koot, vaikka ne eivät olisikaan vielä lopullisessa koossaan. Rakennemallissa kuormituksia ja rasituksia ja toimivuutta tarkastellaan laskentaohjelmassa. Laskentaohjelman tulosten perusteella saadaan tietoa, kestävätkö rakenteet vai tarvitseeko niiden kokoa suurentaa tai pienentää.



Kuvio 5. Tiedonsiirto tietomallin ja rakennemallin välillä (Rustler 2017.)



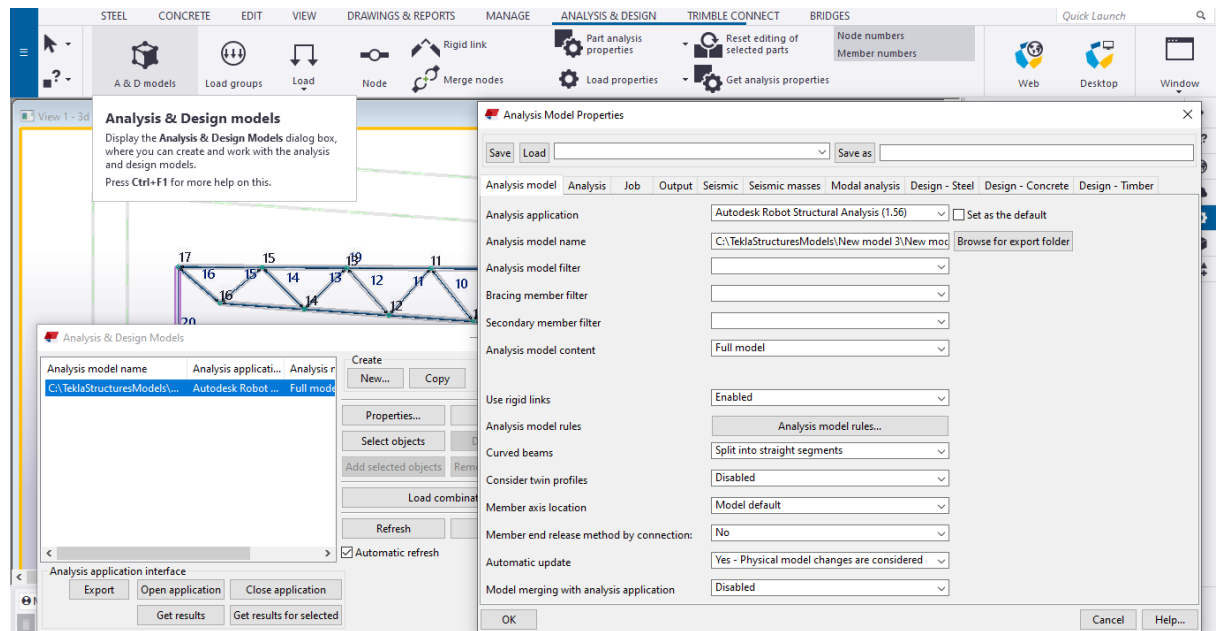
## 4.2 Tiedonsiirto-ohjelmien tutkiminen

Tiedonsiirto-ohjelmien tutkimisen tavoitteena on löytää keino siirtää tietoa nopeasti ohjelmasta toiseen työvaiheiden vähentämiseksi. Ohjelmista tarkastellaan Robot Structuralia ja Tekla Structuresia. Toimivan tiedonsiirto-ohjelman avulla voidaan esimerkiksi siirtää Robot Structuralissa muodostettu teräsrakenteinen halli rakenteiden kestävyys tarkistamisen jälkeen nopeasti Tekla Structuresiin, jolloin samaa hallia ei tarvitse mallintaa uudestaan Teklaan. Lisäksi samalla saadaan jo kestävyydeltään lasketut rakenneprofiilit siirtymään mallinnusohjelmaan. Tiedonsiirrolla saavutetaan myös huomattavia etuja ajankäytön osalta. Robotissa laskettu rakenne saadaan vietyä Teklaan nopeasti, jonka jälkeen ohjelmassa on mahdollista tehdä rakenteen koonpano- ja osapiirustukset, joiden pohjalta rakenne valmistetaan.

## 4.3 Robot Link

Robot Link on Teklan Warehousesta ladattava lisäosa, jolla voidaan siirtää tietoa Teklan ja Robotin välillä. Ohjelman avulla saadaan luotua yhteys Teklan ja Robotin välille niin, että tieto siirtyy ohjelmasta toiseen automaattisesti, eikä käyttäjän tarvitse itse luoda vientitiedostoja. Käyttääkseen Robot Link -sovellusta, tulee käyttäjällä olla asennettuna koneellaan sekä Tekla Structures, että Robot Structural Analysis. (Robot Link n.d) Ennen Linkin käyttöä käyttäjä voi asettaa Teklassa rakenteelle kuormia sekä määrittää tukien ja nivelten paikat. Teklan valikosta löytyy kuviossa 6 näkyvä Analysis & Design -valikko, josta pääsee käsiksi analyysimallin muodostamiseen liittyviin asetuksiin. Valikosta voi määrittää myös eri rakenteille, kuten palkeille ja pilareille alku- ja loppupään tukireaktiot ja kuormitukset. Linkin käyttäminen tiedonsiirtoon tapahtuu seuraavasti:

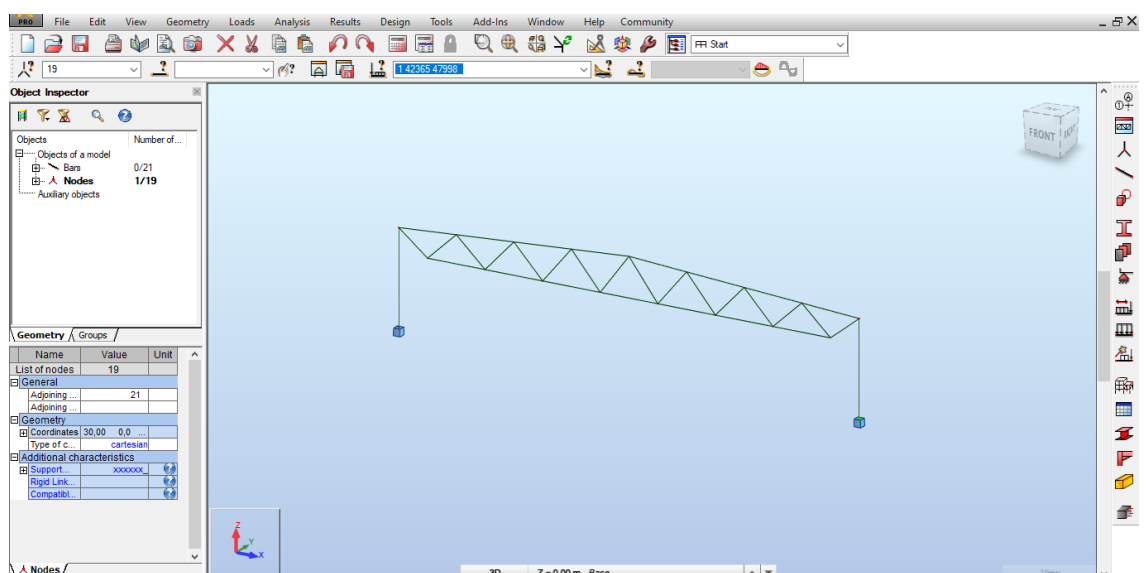
## 1. Analyysimallin muodostaminen Teklassa



Kuvio 6. Robot Link- asetusten määrittäminen Teklassa

Tarvittavien kuormien ja tukireaktioiden määrittäminen jälkeen voidaan määrittää vientiasetukset, joiden mukaisesti siirrettävä rakenne muodostuu Robottiin. A & D -valikosta lisätään uusi analyysimalli, jonka jälkeen aukeaa kuvion 6 mukainen asetusvalikko. Asetusvalikosta analyysiohjelmaksi täytyy valita Autodesk Robot Structural Analysis, jonka jälkeen voidaan määrittää vientiasetukset, kuten koordinaatistoasetukset. Valikossa voi määrittää kuormitusyhdistelmät rakenteelle, jonka jälkeen Export-painikkeella rakenne muodostuu Robottiin. (Astuce Tekla Structures: Robot Structural Analysis & Tekla lien bi directionnel 2017.)

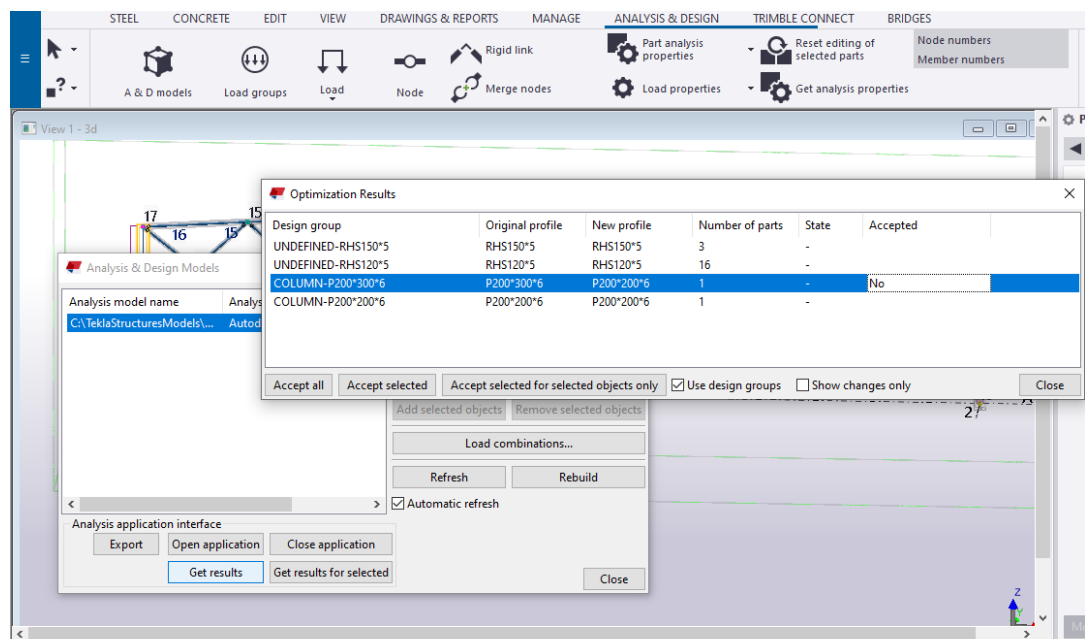
## 2. Rakenteen tarkastaminen Robotissa ja laskennan suoritus



Kuvio 7. Analyysimallin muodostuminen Robottiin Robot Linkin avulla

Tässä esimerkkitapauksessa muodostettiin Robottiin kuvion 7 mukainen rakenne. Rakenteen muodostuttua Robottiin voidaan tarkastaa, että siinä on halutut tukireaktiot, poikkileikkauskoot ja kuormat. Tämän jälkeen voidaan suorittaa laskenta ja analysoida rakenteen toimivuus ja rasitukset.

### 3. Linkin käyttäminen tietojen tuomiseen Robotista Teklaan



Kuvio 8. Tietojen tuonti Robotista Teklaan käyttäen Robot Link -lisäosaa

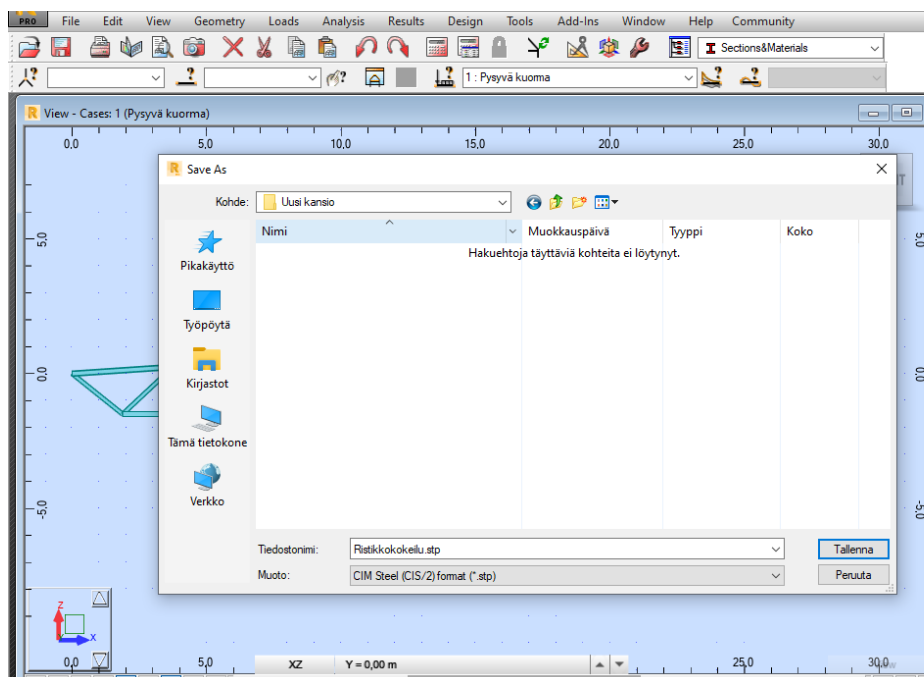
Robot Link- lisäosa toimii myös tiedonsiirtoon Robotista Teklaan. Tiedot voidaan hakea kuviossa 8 näkyvän valikon Get results -painikkeella, jolloin ohjelma hakee muuttuneet poikkileikkaustiedot Robotista. Tämän jälkeen esille tulee valikko, jossa näkyvät muuttuneet poikkileikkaustiedot. Tietojen tuonnin jälkeen Teklassa käyttäjä voi valita, hyväksytäänkö vai hylätäänkö muutos. Hyväksymisen jälkeen poikkileikkauksen koko muuttuu automaattisesti mallissa. (Astuce Tekla Structures: Robot Structural Analysis & Tekla lien bi directionnel 2017.) Esimerkkitapauksessa pilarin kokona käytettiin P200x300x6 putkiprofiilia. Pilarin kooksi muutettiin Robotin bar-valikosta P200x200x6.

#### 4.4 Rakenteen vienti Robotista Teklaan käyttäen CIS/2-formaattia

Rakenteen siirto Robot Structuralista Teklaan voidaan tehdä myös käsin ilman erillistä tiedonsiirto-ohjelmaa. Siirto onnistuu siirtämällä tiedosto käyttäen CIS/2-formaattia. CIS (CIMSteel Integration Standards) on tulosta Eureka CIMSteel-projektista. Nykyinen CIS/2-versio CIS-formaatin toinen sukupolvi. CIS kehitettiin, jotta eri suunnitteluyrityksillä olisi tapa, jolla tietoa voitaisiin jakaa paremmin. CIS toimii ainoastaan kohteille, joissa on teräsobjekteja. (CIS and CIMSteel models 2019.)

Aloitustaulukon avulla muodostetun ristikon laskentamalli siirretään Robotista Teklaan seuraavasti:

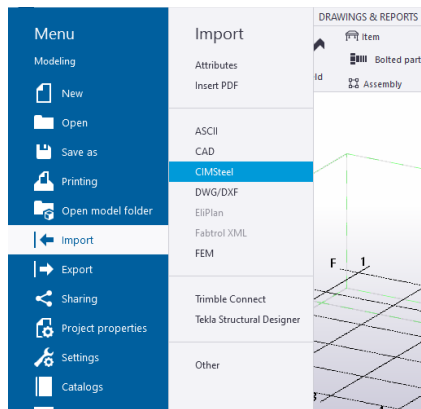
1. Tiedoston tallennus Robotin save as -toiminnolla .stp tiedostomuotoon.



Kuvio 9. Tiedoston tallennus .stp-muotoon Robotissa

Jotta rakenne saadaan siirtymään ohjelmien välillä, on sen oltava tallennettu käyttäen CIS/2-formaattia kuvion 9 mukaisesti. Tiedosto tallennetaan .stp-muotoon, joka voidaan myöhemmin avata Teklassa. (6/6 tutorial Robot Structural. Exportación a Tekla 2019.)

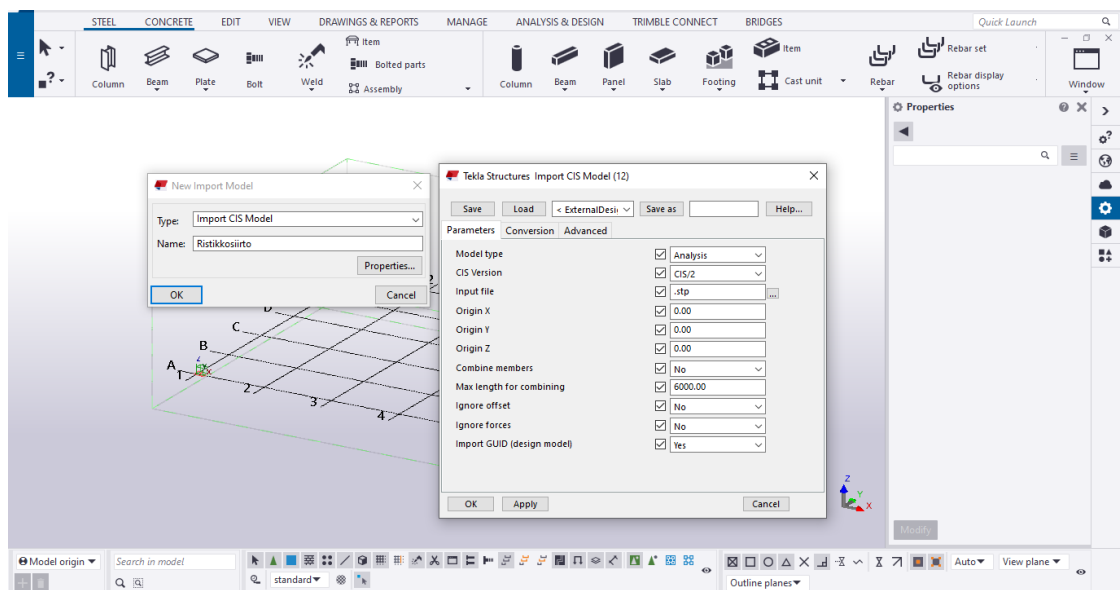
## 2. Tiedoston avaus käyttäen Teklan Import-toimintoa



Kuvio 10. Import-toiminto Teklassa

Teklassa tiedosto avataan käyttäen Import-toimintoa, joka näkyy kuviossa 10. Valikosta valitaan kuvion mukaisesti CIMSteel. (6/6 Tutorial Robot Structural. Exportación a Tekla 2019.)

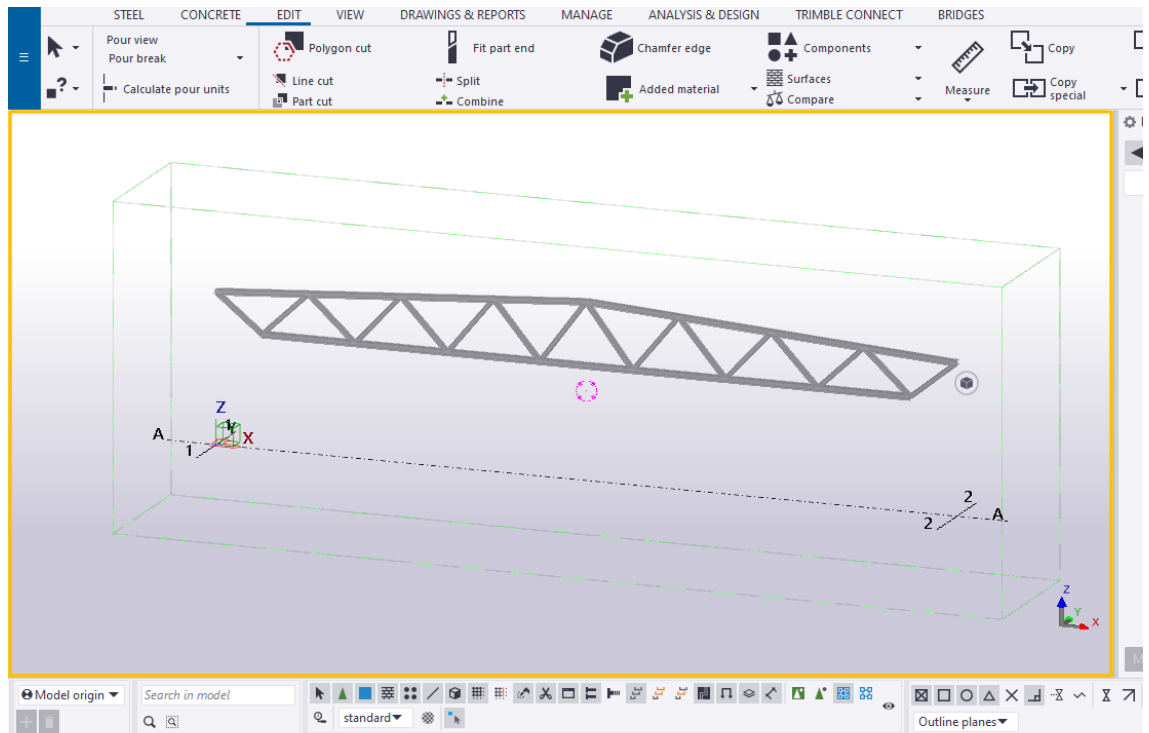
## 3. Tuontiasetusten säätäminen siirrettävälle rakenteelle



Kuvio 11. Rakenteen tuontiasetukset Teklassa

Kuviossa 11 näkyy rakenteen tuontiasetusten valikko. Import-toiminnossa tuotava rakenne nimetään, jonka jälkeen muokataan sen tuontiasetukset. Input file -kohdassa haetaan Robotissa tallennettu .stp-tiedosto sen tallennuskansiosta. Tuontiasetuksissa voidaan muokata rakenteen koordinaatteja ja sen eri osien muodostamista Teklassa. (6/6 Tutorial Robot Structural. Exportación a Tekla 2019.)

#### 4. Tuodun rakenteen asetusten määrittäminen Teklassa



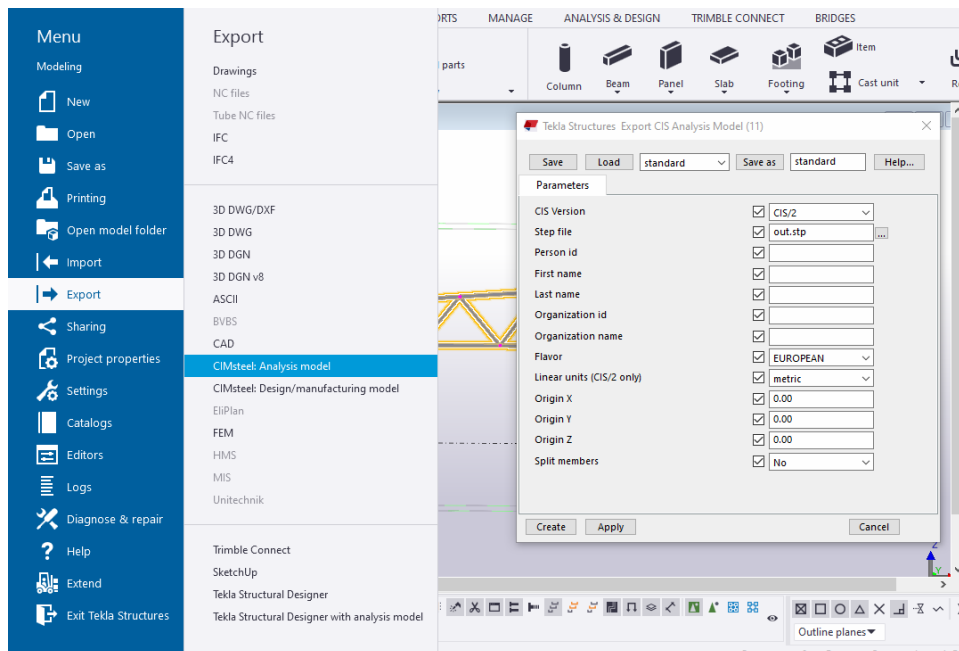
Kuvio 12. Valmis Robotista siirretty rakenne Teklassa

Import-toiminnon jälkeen säädetään rakenteen asetukset. Ohjelmissa profiileille käytetään erilaisia nimitystapoja, jolloin Teklassa täytyy muuttaa profiilit muotoon, joka on käytettävissä kyseisessä ohjelmassa. Tässä tapauksessa Robotissa luodut SQUA-putkiprofiilit muutettiin Teklassa P-putkiprofiilien muotoon. Säättöjen jälkeen rakenne näyttää kuvion 12 mukaiselta.

#### 4.5 Rakenteen vienti Teklasta Robottiin käyttäen CIS/2-formaattia

Kohteen mallinnus tehdään usein Teklassa, jolloin siellä hahmotetaan rakennuksen geometria. Rakenne voidaan mallintaa ensin Teklassa, jolloin nähdään, sopiiko se sille varattuun tilaan. Tämän jälkeen rakenne voidaan siirtää Teklasta Robottiin, jolloin Robotissa tehdään rakenneanalyysi ja tarkistetaan rakenteen kestävyys kuormille ja rasituksille. Siirto Teklasta tehdään seuraavasti:

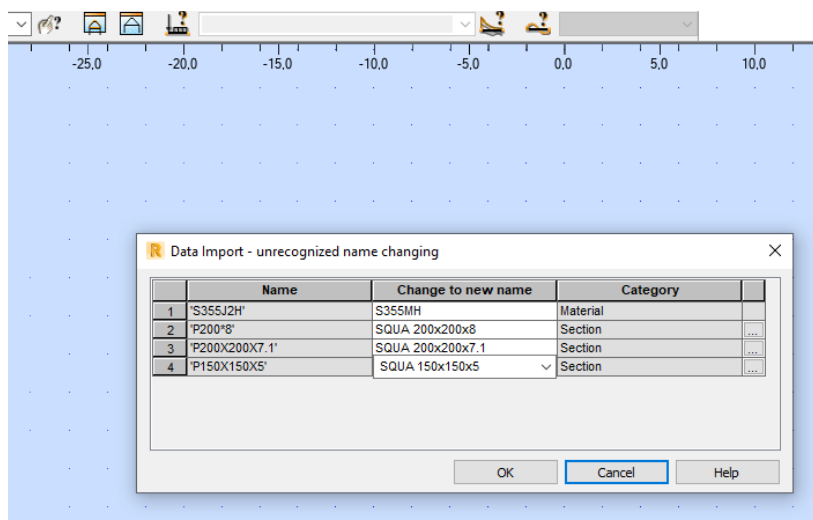
## 1) Tiedoston vienti .stp-muotoon Teklassa



Kuvio 13. Tiedoston vienti .stp-muotoon Teklassa

Kuvion 13 mukaisesti tiedosto muutetaan .stp-muotoon käyttäen Teklan Export-toimintoa päävalikossa. Export-välilehdeltä valitaan "CIMsteel: Analysis model", jonka jälkeen aukeaa kuvan mukainen asetusvalikko. Valikkoon syötetään omat tiedot, jonka jälkeen tiedosto voidaan luoda. (CIS and CIMSteel models 2019.)

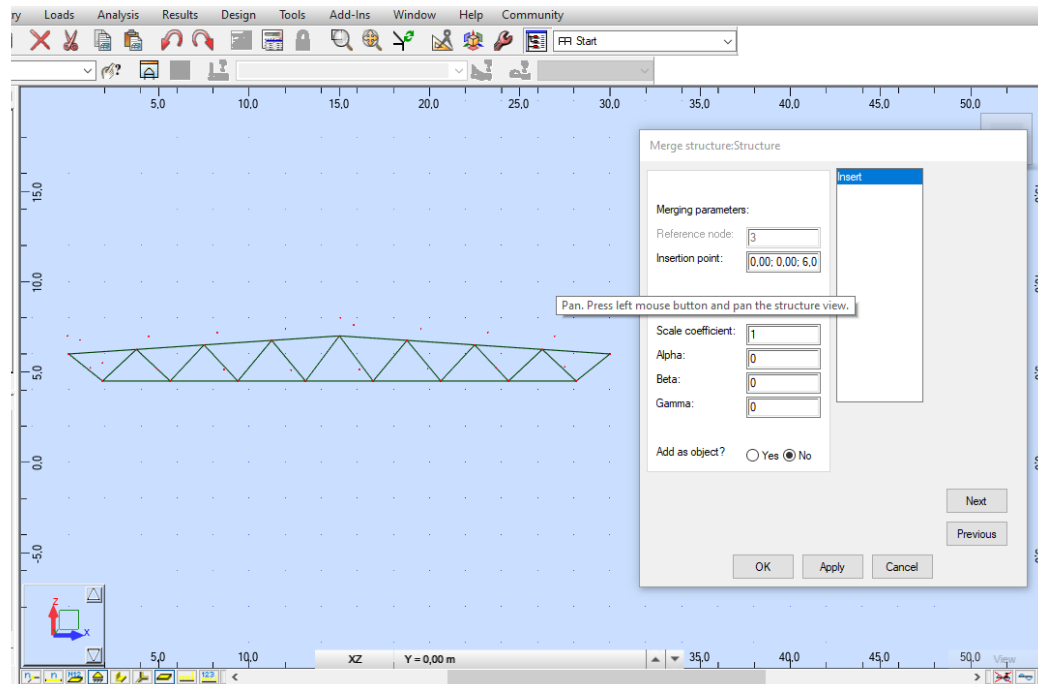
## 2) Profiilien ja materiaalin säätö Robotissa



Kuvio 14. Tuontiasetukset Robotissa

Teklalla luotu .stp-tiedosto avataan Robotin Open-toiminnolla. Ohjelmissa voidaan käyttää eri nimityksiä profiileista, kuten kuviossa 14 näkyy. Teklassa rakenne voi olla esimerkiksi P200x200x7.1, jota Robotissa ei ole saatavilla, joten profiilille täytyy asettaa uusi nimitystapa. (Data Import (DSTV or CIS/2 format) n.d)

### 3) Tuodun rakenteen koordinaattiasetusten säätäminen Robotissa



Kuvio 15. Teklasta tuotu rakenne Robotissa

Profiilien ja materiaalien muuttamisen jälkeen säädetään tuodulle rakenteelle haluttu koordinaatit Robotissa, jonka jälkeen tuotu rakenne muodostuu näytölle. Ohjelma luo mahdollisesti uusia pisteitä koordinaatistoon, jotka voidaan poistaa ennen rakenteen laskemista. Kuviossa 15 näkyy valmis Teklasta tuotu kattoristikko Robotissa.



## 5 Esimerkkilaskelma

Esimerkkilaskennassa käydään läpi teräsrakenteisen teollisuushallin suunnitteluperusteet ja teräsristikkokehän rakenteiden mitoitus. Parametrinen työkalu toimii tällä hetkellä harjakattoristikoiden mitoitukseen, joten tässä luvussa tehdään myös kattoristikon voimien laskenta ja sauvojen alustava mitoitus. Työkalulla ei vielä voi laskea pilareita, joten pilareiden laskenta käydään erillisenä esimerkkinä läpi liitteessä 3.

### 5.1 Esimerkkirakennuksen lähtötiedot

Esimerkkikohde sijaitsee Haminassa, merelle avoimella rannikolla. Hallissa on 6 kpl teräsristikkokehiä ja päädyissä palkit. Mitoituksessa ei käydä läpi perustusmitoitusta. Hallissa ei ole välipohjaa eikä nosturia. Halliin kohdistuu rakenteista tulevat omapainot sekä lumi- ja tuulikuormat.

Hallin lähtötiedot:

- Hallin pituus  $L = 43184$  mm
- Hallin leveys  $B = 24384$  mm
- Vapaa korkeus  $H = 6400$  mm
- Kehäväli  $A = 6100$  mm
- Kattoristikon korkeus  $2340$  mm

### 5.2 Suunnitteluperusteet

#### **Yleistä**

Teollisuushalli sijaitsee Haminassa, merelle avoimella rannikolla. Tontilla ei ole aikaisempia rakennuksia. Paikkakunta-kohtainen lumikuorma Haminassa on maassa  $2,75 \text{ kN/m}^2$ .

#### **Perustukset ja kellarirakenteet**

Teräshallin perustukset ovat teräsbetoniset pilarianturat. Rungon kantavina rakenteina ovat teräsristikkokehät, päädyissä pilarit ja palkit. Seinät tehdään valmiista seinäelementeistä, joissa on julkisivuna ohutpelti. Perustusten käyttöikä on 100 vuotta.

Suunnittelun vaativuusluokka: Vaativa

Suunnittelukäyttöikä: 100 vuotta

### **Runkorakenteet**

Suunnittelun vaativuusluokka: Vaativa

Suunnittelukäyttöikä: 50 vuotta

Paloluokka: EI30

### **Mitoitusperusteet ja kuormitukset**

Seuraamusluokka: CC2

Luotettavuusluokka: RC2

### **Murtorajatilayhdistelyt**

EN1990 mukaan

### **Käyttörajatila**

EN1993-1-1 mukaan

### **Kuormat**

Katto

Pysyvät kuormat:

- Yläpohjarakenne  $0,4 \text{ kN/m}^2$
- Ripustuskuorma  $0,3 \text{ kN/m}^2$

Lumikuorma:

- $s_k=2,75 \text{ kN/m}^2$  lumikuorma maassa
- Tuulensuojaisuuskerroin  $C_e=0,8$
- Katon muotokerroin  $\mu_1=0,8$

Tuulikuorma:

- Maastoluokka 0:  $q_{p0}(z)=1,07 \text{ kN/m}^2$  ( $z=8,82 \text{ m}$ )

### 5.3 Kattoristikon mitoitus

Jänneväli=23,9m

Kehäväli=6,1m

Ristikon omapaino (arvio)  $g_{k1}=0,5 \text{ kN/m}^2$

Ripustuskuorma  $g_{k2}=0,3 \text{ kN/m}^2$

Yläpohjarakenteen paino (arvio)  $g_{k3}=0,4 \text{ kN/m}^2$

Omapainot yhteensä  $g_k=1,2 \text{ kN/m}^2$

Lumikuorma  $s=1,76 \text{ kN/m}^2$

Tuulikuorma  $q_{wk}=1,07 \text{ kN/m}^2 \cdot -0,58 + 1,07 \text{ kN/m}^2 \cdot -0,3 = -0,9 \text{ kN/m}^2$  (vyöhyke H, tuulen suunta  $0^\circ$ )

$g_k=6,1\text{m} \cdot 1,2 \text{ kN/m}^2 = 7,32 \text{ kN/m}$

$q_k=6,1\text{m} \cdot 1,76 \text{ kN/m}^2 = 10,74 \text{ kN/m}$

$q_{wk}=6,1 \cdot 0,9 \text{ kN/m}^2 = 5,49 \text{ kN/m}$

$g_d=1,15 \cdot 7,32 \text{ kN/m} = 8,42 \text{ kN/m}$

$q_d=1,5 \cdot 10,74 \text{ kN/m} = 16,11 \text{ kN/m}$

$q_{wd}=0,9 \cdot 5,49 \text{ kN/m} = 4,94 \text{ kN/m}$

$p_d=8,42 \text{ kN/m} + 16,11 \text{ kN/m} + 4,94 \text{ kN/m} = 29,47 \text{ kN/m}$

Maksimi momentti lasketaan kaavalla 37:

$$M_d = (p_d \cdot L^2) / 8 = (29,47 \text{ kN/m} \cdot (23,9 \text{ m})^2) / 8 = 2104 \text{ kNm} \quad (37)$$

Määritetään ristikon korkeudeksi  $L/10 \approx 2340 \text{ mm}$

Tukikorkeudeksi valitaan 1000mm.

Valitaan yläpaarteen aukkojen määräksi yhdelle lappeelle 5kpl, jolloin uumasauvojen väliksi tulee  $23900\text{mm}/10 = 2390\text{mm}$ .

**Alustavat sauvavoimat**

Ylä- ja alapaarre

$$N_{0.Ed} \approx \frac{q_d * L^2}{8H} = M_{Ed}/H = 2104 \text{ kNm} / 2,34 \text{ m} = 899,1 \text{ kN}$$

Alustava koko lasketaan kaavalla 38, kun alapaarre (vedetty) ja yläpaarre (puristettu):

$$A_{vaadittu} \geq \gamma_{M0} * N_{0.Ed} / f_y = 1,0 * 899100 \text{ N} / 355 \text{ N/mm}^2 = 2533 \text{ mm}^2 \quad (38)$$

Profiili esimerkiksi CFSHS 150x150x5 S355 2836 mm<sup>2</sup> tai 160x160x5 S355 3036 mm<sup>2</sup>

Nurjahduspituus yläpaarteelle lasketaan kaavalla 39:

Paarten solmuväli L=2,41m

$$L_{cr} = L_{cr,z} = L_{cr,y} = 0,9 * 2,41 \text{ m} = 2,17 \text{ m} \quad (39)$$

Diagonaalit:

Alustava sauvavoima diagonaalille:

$$N_{i.Ed} \approx 0,5 * q_d * L\sqrt{2} = 0,5 * 29,47 \frac{\text{kN}}{\text{m}} * 23,9 \text{ m} * \sqrt{2} = 498,0 \text{ kN}$$

$$A_{diag.vaadittu} \geq 1,0 * 498000 \text{ N} / 355 \text{ N/mm}^2 = 1403 \text{ mm}^2$$

Profiili esimerkiksi CFSHS 120x120x4 S355 1815 mm<sup>2</sup>

Nurjahduspituus uumasauvalle lasketaan kaavalla 40:

Uumasauvan systeempituus L=1,72 m

$$L_{cr} = 0,75 * L = 0,75 * 1,72 \text{ m} = 1,29 \text{ m} \quad (40)$$

## 6 Käyttöönottosuunnitelma parametriselle työkalulle

### Jatkokehitys ennen käyttöönottoa

Opinnäytetyöhön kehitettyä parametrista työkalua kehitetään vielä ennen sen käyttöönottoa yrityksessä. Työkalua kehitetään niin, että siinä käyttäjä voi valita ristikkoon halutessaan vertikaalit diagonaalien välille. Vertikaalien avulla mitoitus voi muuttua edullisemmaksi, ja paarteiden kokoa voidaan muuttaa pienemmäksi. Vertikaalien lisäämisen jälkeen työkalua voidaan käyttää monipuolisemmin.

### Alkutestaus

Vertikaalien lisääksen jälkeen työkalua aletaan testaamaan mitoitus-työssä. Alkutestauksen aikana työkalulla mitoitettuja ristikoita verrataan jo toteutuneisiin teräskoh-teisiin. Vertailun avulla saadaan tietoa työkalun toimivuudesta ja alustavan mitoitus-tuksen täsmällisyydestä. Vertailun tarkoituksena on myös havaita työkalussa olevia vir-heitä, jotka vaikuttavat osien mitoitukseen. Vertailemalla jo toteutuneiden kohteiden kattoristikoita työkalulla mitoitettaviin ristikoihin saadaan arvokasta tietoa työkaluun kehittämiseen. Kehitysprosessin tarkoituksena on paikallistaa erot työkalulla mitoit-etun ristikon ja toteutuneen kohteen ristikon välillä, jolloin virheet voidaan paikallistaa ja korjata, jolloin työkalusta saadaan tarkempi ja luotettavampi. Alkutestauksen pe-rusteella tehdään valinnat työkalun jatkokehitykselle.

### Jatkokehityskohteet

Parametriseen työkaluun on tarkoitus myös lisätä jatkokehityksenä muita mitoitus-vaihtoehtoja. Valmiita jatkokehityskohteita työkalulle ovat laperistikoiden ja pilarei-den lisääminen työkaluun. Laperistikoiden lisäämisellä työkalua saadaan monipuoli-semmaksi ja työkalulla voidaan verrata nopeasti eri ristikkotyyprien eroja ja esimer-kiksi teräsosien määrää. Pilareiden lisäämisen jälkeen työkalulla saadaan muodostet-tua kerralla kokonainen teräsristikokehä, jolloin rasiusten laskeminen helpottuu ja nopeutuu.

## 7 Pohdinta ja johtopäätökset

Opinnäytetyön tavoitteena oli kehittää Microsoft Exceliin teräsrakenteisen putkipalkkiristikon rakenteiden mitoittamiseen parametrinen aloitustaulukko, jonka avulla saadaan laskettua alustavat profiilikoot ristikon ylä- ja alapaarteille sekä diagonaalisauvoille. Parametriseen aloitustaulukkoon liittyi myös tiedonsiirron ohjelmoiminen ja teräsristikon siirtäminen ohjelmistorajapintaa hyödyntäen Excelistä Robot Structuraaliin, jossa se muodostuu lähtötietojen mukaisena ristikkorakenteena. Opinnäytetyön tavoitteena oli myös tehdä esimerkkilaskelma teräsristikkokehän rakenteista sekä tutkia tietomallien välistä tiedonsiirtoa ja mahdollisuuksia siirtää eri ohjelmilla muodostettuja rakenteita ohjelmasta toiseen.

Parametrisella suunnittelulla saavutetaan rakennesuunnittelussa monia hyötyjä. Tärkeimpinä niistä on toistuvien työvaiheiden karsiminen ja työn nopeuttaminen, kun samoja asioita ei tarvitse tehdä useaan kertaan. Parametrisen työkalun avulla vaativaan suunnitteluluokkaan kuuluvaan teräsrakenteiseen halliin saadaan nopeasti määritettyä alustava mitoitus kattoristikon eri osille. Parametrisella työkalulla saadaan käyttäjän itse syöttämien lähtötietojen perusteella laskettua kätevästi hallin rakenteiden painot sekä lumi- ja tuulikuormat.

Normaalisti hallin ristikkorakenteen mitoittamiseen tarvitaan monia työkaluja, joilla lasketaan kuormia sekä rasituksia. Kattoristikon eri osiin kohdistuvia rasituksia ei voi laskea helposti käsin, joten rakenteesta on muodostettava laskentamalli laskentaohjelmaan. Tavallisesti laskentamallin muodostaminen käsin on aikaa vievää, koska kaikki ristikon sauvojen koordinaatit on määriteltävä ja pisteet on lisättävä itse yksitellen ohjelmaan. Tämän jälkeen pisteiden välille on lisättävä käsin sauvat. Lisäksi malliin on lisättävä tuet ja ristikkoon kohdistuvat kuormat yksitellen. Parametrisen suunnittelun avulla kaikki edellä mainitut vaiheet saa tehtyä yhdellä työkalulla ilman työvaiheiden toistamista.

Teräsrakenteiden mitoitus on haastavaa ja asiat täytyy ymmärtää tehdessä suunnittelua. Opinnäytetyön aihe oli haastava ja mielenkiintoinen alusta asti, joten työtä oli

erittäin kiinnostavaa tehdä. Haastavuuden vuoksi aiheeseen täytyi paneutua kunnolla, jotta työkalu toimii oikein ja laskenta on tehty eurokoodien mukaisesti. Tuloksena työstä on parametrinen työkalu, jolla työskentelyä ja mallintamista voidaan tehostaa ja nopeuttaa. Suunnitteluperusteet ja esimerkkilaskenta helpottavat suunnittelutyötä. Tietomallinnusta tehdään rakennesuunnittelussa koko ajan enemmän, joten opinnäytetyössä tutkitut tiedonsiirtomahdollisuudet tietomallien välillä ovat käteviä apuvälineitä mallinnuksessa, kun rakenteita täytyy siirtää esimerkiksi Teklan ja Robotin välillä.

Opinnäytetyön tavoite saavutettiin ja sain opinnäytetyön kautta hyvää oppia teräsrakenteiden mitoituksista ja varsinkin teräsristikon toiminnasta. Parametrissa työkalua tehdessä opettelin itse koodausta API:a hyödyntäen ja onnistuin tiedonsiirron ohjelmoinnissa Excelin ja Robotin välillä. Opinnäytetyön kautta innostuin ohjelmoinnin opettelusta ja ohjelmistorajapinnan hyödyntämisestä, joten jatkossa haluan kehittää taitojani näissä osa-alueissa.

Opinnäytetyön työn tuloksia voidaan hyödyntää konkreettisesti tehdessä teräsrakenteisen hallin rakennesuunnittelua. Parametrisen työkalun avulla saadaan nopeasti tuloksia kuormista ja rakenteiden kestävydestä. Tiedonsiirto-ohjelmia voidaan hyödyntää suunnittelussa, kun malleja täytyy siirrellä eri ohjelmien välillä. Parametrissa työkalussa on loistavia kehitysmahdollisuuksia. Työkaluun voidaan lisätä eri hallin rakenteita ja jatkokehityksenä työkalua kehitetään niin, että sillä voi laskea esimerkiksi laperistikoita ja pilareita. API:n hyödyntämismahdollisuudet rakennesuunnittelussa ovat erittäin hyvät, koska ohjelmistot kehittyvät jatkuvasti ja monipuolisiin työkaluihin halutaan panostaa.

## Lähteet

6/6 Tutorial Robot Structural. Exportación a Tekla. 2019. Video Youtubessa.

28.3.2020. <https://www.youtube.com/watch?v=t2MozMIPgro>

Astuce Tekla Structures: Robot Structural Analysis & Tekla lien bi directionnel. 2017.

Video Youtubessa. Viitattu 11.4.2020.

<https://www.youtube.com/watch?v=laz9xKpNgFQ>

CIS and CIMsteel models. 2019. Ohje Teklan Structuresin sivustolla. Viitattu 2.4.2020.

[https://teklastructures.support.tekla.com/2019i/en/int\\_cis2](https://teklastructures.support.tekla.com/2019i/en/int_cis2)

Data Import (DSTV or CIS/2 format). N.d. Ohje Autodeskin sivustolla. Viitattu

27.4.2020. [https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-pro-](https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Robot/files/GUID-3FB0709C-4A9C-4794-A920-BA6E7A4E7148-htm.html)

[ducts/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Robot/files/GUID-](https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Robot/files/GUID-3FB0709C-4A9C-4794-A920-BA6E7A4E7148-htm.html)

[3FB0709C-4A9C-4794-A920-BA6E7A4E7148-htm.html](https://knowledge.autodesk.com/support/robot-structural-analysis-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2015/ENU/Robot/files/GUID-3FB0709C-4A9C-4794-A920-BA6E7A4E7148-htm.html)

Fisher, A. & Sharma S. N.d. Exploiting Autodesk Robot Structural Analysis Professional

API for Structural Optimization. Viitattu 2.4.2020. [https://bimandbeam.type-](https://bimandbeam.typepad.com/AUTODESKROBOT_structuralanalysisprofessional_WHITEPAPER_final.pdf)

[pad.com/AUTODESKROBOT\\_structuralanalysisprofessional\\_WHITEPAPER\\_final.pdf](https://bimandbeam.typepad.com/AUTODESKROBOT_structuralanalysisprofessional_WHITEPAPER_final.pdf)

Gawęda, R. & Kosakowski A. 2015. Results Connect, Robot API, Dynamo. Video You-

tubessa. Viitattu 25.3.2020. <https://www.youtube.com/watch?v=tYvb6IzjNmQ>

Kaitila, O. 2014. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3-oppikirja. Hel-

sinki: Teräsrakenneyhdistys.

Kananen, J. 2017. Laadullinen tutkimus pro graduna ja opinnäytetyönä. Jyväskylä: Jy-

väskylän ammattikorkeakoulu.

Ongelin, P. & Valkonen I. 2016. SSAB Domex Tube Rakenneputket – EN1993 Käsikirja

2016. Keuruu: SSAB Europe.



Parametric Modelling. N.d. Verkkodokumentti DesignTechin sivustolla. Viitattu 16.4.2020. <https://www.designtechsys.com/articles/parametric-modelling>

Rakenteiden lujuus ja vakaus. 2016. Ladattava dokumentti Ympäristöministeriön sivustolla. Viitattu 13.2.2020. <https://www.ym.fi/download/noname/%7BC352472F-E7C4-4653-BF44-1AB47FB50CB0%7D/137127>

RIL 201-1-2017. Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat. Helsinki: Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL.

Robot Link. N.d. Verkkodokumentti Tekla Warehousen sivustolla. Viitattu 11.4.2020. <https://warehouse.tekla.com/#!/catalog/details/u0f2b9398-5a01-4c83-87c1-d778a63610d4>

Robot Structural Analysis Professional. N.d. Verkkodokumentti Autodeskin sivustolla. Viitattu 11.4.2020. <https://www.autodesk.com/products/robot-structural-analysis/overview>

Rustler, W. 2017. Building Information Modeling and Structural Analysis Software: Scenarios and Success Factors for Data Exchange. Viitattu 11.4.2020. <https://www.dlubal.com/en/support-and-learning/support/knowledge-base/001432>

Stocking, A. 2016. The Future of Structural Engineering Will Survive the High-Tech Revolution. Viitattu 10.3.2020. <https://www.autodesk.com/redshift/future-of-structural-engineering/>

Tekla Structures. N.d. Verkkodokumentti Teklan sivustolla. Viitattu 11.4.2020. <https://www.tekla.com/fi/tuotteet/tekla-structures>

Tietoa Vahasesta. N.d. Verkkodokumentti Vahasen sivustolla. Viitattu 5.2.2020. <https://vahanen.com/fi/vahanen>

Tietomallinnus. N.d. Verkkodokumentti Suomen Rakennusinsinöörien Liiton sivustolla. Viitattu 29.4.2020. <http://ril.easypage.fi/fi/alan-kehittaminen/tietomallinnus.html>

## Liitteet

### Liite 1. Kuormien laskenta pilarille

Esimerkkilaskelmissa käydään pilarin mitoitus pääosiltaan läpi, kaikkia välivaiheita ei käydä läpi.

Arvioidaan kattoristikon paarteiden kooksi 200x200x6, SSAB Domex Tube Double Grade. Pilarin kooksi arvioidaan 250x250x6, SSAB Domex Tube Double Grade.

*Kuormitusväli  $A=6,1m$*

*Kattoristikon omapaino  $G_{k,1}=0,5 \text{ kN/m}^2$*

*Kattorakenteiden omapaino  $G_{k,2}=0,40 \text{ kN/m}^2$*

*Ripustuskuorma  $G_{k,3}=0,30 \text{ kN/m}^2$*

*Pilarin omapaino  $G_{k,4}=0,45 \text{ kN/m}$*

*Tuulikuorma pilarille  $q_{wk}=(1,07 \text{ kN/m}^2 \cdot -1,2)+(1,07 \text{ kN/m}^2 \cdot -0,3)=-1,61 \text{ kN/m}^2$  (vyöhyke A, imua)*

*Tuulikuorma metrille  $q_{wk}=6,1m \cdot (1,61 \text{ kN/m}^2)=9,82 \text{ kN/m}$*

*Lumikuorma katolla  $s=\mu_1 C_e C_{ts} k=0,8 \cdot 0,8 \cdot 1,0 \cdot 2,75 \text{ kN/m}^2=1,76 \text{ kN/m}^2$*

*Lumikuorma metrille  $=6,1m \cdot 1,76 \text{ kN/m}^2=10,74 \text{ kN/m}$*

### Omapainot

Määritetään rakenteiden omapainot metriä kohden [kN/m] kaavalla 41.

*Omapainot yhteensä  $G_k= G_{k,1}+G_{k,4}+A \cdot (G_{k,2}+G_{k,3})$  (41)*

$$=0,45 \text{ kN/m} + 6,1 \text{ m} \cdot (0,50 \text{ kN/m}^2 + 0,40 \text{ kN/m}^2 + 0,30 \text{ kN/m}^2)$$

$$=7,77 \text{ kN/m}.$$

## Liite 2. Kuormitusyhdistelmien määrittäminen pilarin mitoittamiseen

### Kuormitusyhdistelmät pilarin mitoittamiseen

Määritetään seuraavaksi pilarin mitoittamiseen tarvittavat kuormitusyhdistelmät. Rakenneputkesta tehdyn pilarin mitoituksessa pelkkä omapaino tulee mitoittavaksi yhdistelmäksi vain harvoin. Muuttuvan kuorman ollessa tuulikuorma, pilariin kohdistuva normaalivoima  $N_{Ed}$  on usein pienempi kuin lumikuorman ollessa muuttuvana kuormana, mutta tuulikuorma lisää pilarin alapäässä olevaa momenttia  $M_{Ed}$  sekä leikkausvoimaa  $V_{Ed}$ .

Kuormitusyhdistelmä 1, kuormina rakenteiden omapainot:

$$\begin{aligned} p_d &= 1,35 \cdot K_{FI} \cdot G_k \\ &= 1,35 \cdot 1,0 \cdot (7,77 \text{ kN/m}) \\ &= 10,5 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Kuormitusyhdistelmä 2, kun muuttuvana kuormana lumikuorma:

$$\begin{aligned} p_d &= 1,15 \cdot K_{FI} \cdot G_k + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{ks} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot (\psi_0 \cdot Q_k + \psi_0 \cdot Q_{kw}) \\ &= 1,15 \cdot 1,0 \cdot 7,77 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 10,74 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 1,0 \cdot (0,6 \cdot 9,82 \text{ kN/m}) \\ &= 33,9 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Kuormitusyhdistelmä 3, kun muuttuvana kuormana tuulikuorma:

$$\begin{aligned} p_d &= 1,15 \cdot K_{FI} \cdot (G_k) + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{kw} + 1,5 \cdot K_{FI} \cdot (\psi_0 \cdot Q_{ks} + \psi_0 \cdot Q_k) \\ &= 1,15 \cdot 1,0 \cdot (7,77 \text{ kN/m}) + 1,5 \cdot 1,0 \cdot 9,82 \text{ kN/m} + 1,5 \cdot 1,0 \cdot (0,7 \cdot 10,74 \text{ kN/m}) \\ &= 35,0 \text{ kN/m} \end{aligned}$$

Lasketaan seuraavaksi pilariin kohdistuvat rasitukset.

**Kuormitusyhdistelmä 2**

Muuttuvan kuorman ollessa lumikuorma, saadaan seuraavat rasitukset:

Normaalivoima  $N_{Ed}=305,3$  kN puristusta

Momentti pilarin alapäässä  $M_{Ed}=45,3$  kNm

Leikkausvoima pilarin alapäässä  $V_{Ed}=35,4$  kN.

**Kuormitusyhdistelmä 3**

Muuttuvan kuorman ollessa tuulikuorma, saadaan seuraavat rasitukset:

Normaalivoima  $N_{Ed}=246,0$  kN puristusta

Momentti pilarin alapäässä  $M_{Ed}=75,4$  kNm

Leikkausvoima pilarin alapäässä  $V_{Ed}=58,9$  kN.

### Liite 3. Pilarin mitoitus

#### Pilarin mitoitus

Kokeillaan pilarin kokoa 260x180x7,1 S355J2H. Poikkileikkausluokka 3. Lähtötiedot ovat:

$$A=5873 \text{ mm}^2.$$

$$I_y=5557*10^4 \text{ mm}^4; I_z=3163*10^4 \text{ mm}^4.$$

$$W_{el,y}=427,5*10^3 \text{ mm}^3; W_{el,z}= 351,4*10^3 \text{ mm}^3.$$

#### Pilarin nurjahduspituus $L_{cr}$

Lasketaan nurjahduspituus kaavalla 42. Pilarin liitos perustuksiin jäykkä, joten

$$L_{cr,y}=L_{cr,z}=0,8*L \quad (42)$$

$$L_{cr}=0,8*6,4m=5,12m$$

#### Pilarin puristuskestävyys

Mitoitusehto  $N_{c,Rd} \geq N_{Ed}$

$$N_{c,Rd} = (A * f_y) / \gamma_{M1} = (5873 \text{ mm}^2 * 355 \text{ N/mm}^2) / 1,0 = 2085 \text{ kN}$$

$$2085 \text{ kN} > 305,3 \text{ kN (KY2) OK}$$

#### Pilarin taivutuskestävyys

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{el} * f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{427500 \text{ mm}^3 * 355 \text{ N/mm}^2}{1,0} = 151,8 \text{ kNm}$$

$$151,8 \text{ kNm} \geq 75,4 \text{ kNm (KY3) OK}$$

#### Pilarin nurjahduskestävyys

Mitoitusehto:  $N_{Ed} \leq N_{b,Rd}$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi * A * f_y}{\gamma_{M1}} = 0,59 * 5873 \text{ mm}^2 * 355 \text{ N/mm}^2 / 1,0 = 1230 \text{ kN (PL 1-3)}$$

$$\chi_z, \text{ kun } \bar{\lambda} > 0,2 = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0,59$$

$$\phi = 0,5 * [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 * [1 + 0,49(0,91 - 0,2) + 0,91^2] = 1,088$$

$$\alpha = 0,49 \text{ (nurjahduskäyrä c)}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{(A * f_y) / N_{cr}} = \sqrt{(5873 \text{ mm}^2 * 355 \text{ N/mm}^2) / 2500800 \text{ N}} = 0,91$$

$$N_{cr} = (\pi^2 * EI) / L_{cr}^2 = 2500,8 \text{ kN}$$

$$N_{b,Rd} = 1230 \text{ kN} > 305,3 \text{ kN (KY2) OK}$$

### Leikkauskestävyys

Mitoitusehto:  $V_{Ed} \leq V_{Rd}$

Lasketaan, tarvitseeko poikkileikkaukselle laskea leikkauslommahduskestävyyttä:

$$\frac{h}{t} \leq \frac{72 * \varepsilon}{\eta} + 3 = \frac{260 \text{ mm}}{7,1 \text{ mm}} \leq \frac{58,6}{1,0} + 3 = 36,6 \leq 61,6 \rightarrow \text{määritetään leikkauskestävyys}$$

seuraavasti:

$$V_{pl,Rd} = A_v * \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 3470 \text{ mm}^2 * \frac{\frac{355 \text{ N}}{\sqrt{3}}}{1,0} = 711,2 \text{ kN} > V_{Ed} = 58,9 \text{ kN (KY3) OK}$$

$$A_v = A \frac{h}{b + h} = 3470 \text{ mm}^2$$

### Pilarin kiepahduskestävyys

Tarkistetaan ehto kiepahdukselle kaavojen 43 ja 44 ja taulukon 6 avulla, tarvitseeko profiilin kiepahdusta tarkastaa:

$$\frac{b-t}{h-t} = \frac{180 \text{ mm} - 7,1 \text{ mm}}{260 \text{ mm} - 7,1 \text{ mm}} = 0,68 \quad (43)$$

$$\frac{L_c}{h-t} = 72,0 \text{ (lujuus } 355 \text{ N/mm}^2)$$

$$L_c = 72,0 * (260 \text{ mm} - 7,1 \text{ mm}) = 18,2 \text{ m} \geq L = 6,4 \text{ m}$$

(44)

Koska  $L_c > L$ , kiepahdus ei pienennä kestävyyttä, joten kiepahduskestävyyttä ei tarvitse tarkastaa.

### **Yhteisvaikutusehto taivutukselle ja puristukselle**

Yhteisvaikutuskaava taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen kuormittamille sauvoille:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} * \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} * \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} * \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} * \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} * \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0, \text{ missä}$$

$$\text{KY3: } N_{Ed} = 246,0 \text{ kN; } M_{y.Ed} = 75,4 \text{ kNm, } M_{z.Ed} = 0 \text{ kNm}$$

$$\Delta M_{y.Ed} = 0 \text{ kNm; } \Delta M_{z.Ed} = 0 \text{ kNm}$$

$N_{Rk}$ ,  $M_{y.Rk}$  ja  $M_{z.Rk}$  ovat PL-luokan mukaiset ominaisarvot puristus- ja taivutuskestävyyksille.  $N_{Rk}$  lasketaan kaavalla 45 ja  $M_{y.Rk}$  lasketaan kaavalla 46.

$$N_{Rk} = f_y * A = 355 \text{ N/mm}^2 * 5873 \text{ mm}^2 = 2084,92 \text{ kN} \quad (45)$$

$$M_{y.Rk} = f_y * W_{el,y} = 355 \text{ N/mm}^2 * 427500 \text{ mm}^3 = 151,8 \text{ kNm} \quad (46)$$

$$\psi = 0$$

$$\chi_y = 0,69; \chi_z = 0,59; \chi_{LT} = 1,0 \text{ (kiepahdus ei pienennä kestävyyttä)}$$

$$\bar{\lambda}_y = 0,69; \bar{\lambda}_z = 0,91$$



Lasketaan  $k_{yy}$  kaavalla 47.  $C_{my}$  määritetään kaavojen 48 ja 49 avulla.  $k_{zy}$  määritetään kaavalla 50.

$$k_{yy} = C_{my} \left[ 1 + 0,6 * \bar{\lambda}_y * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \leq C_{my} \left[ 1 + 0,6 * \frac{N_{Ed}}{\chi_y * \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} \right] \quad (47)$$

$$= 0,55 \left[ 1 + 0,6 * 0,69 * \frac{246000 N}{0,69 * \frac{2084920 N}{1,0}} \right] = 0,577 \leq 0,589 \text{ Ok}$$

$$C_{my} = 0,1 - 0,8 * \alpha_s \geq 0,4 = 0,1 - 0,8 * (-0,563) = 0,55 > 0,4 \text{ Ok} \quad (48)$$

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = - \frac{\frac{9}{128} * q_{wd} * L^2}{M_h} = - \frac{\frac{9}{128} * 14,73 \frac{kN}{m} * (6,4m)^2}{75,4 kNm} = - \frac{42,42 kNm}{75,4 kNm} = -0,563 \quad (49)$$

$$k_{zy} = 0,8 * k_{yy} = 0,8 * 0,577 = 0,462 \quad (50)$$

$$\frac{246000 N}{0,69 * \frac{2084920 N}{1,0}} + 0,577 * \frac{75,4 * 10^6 Nmm + 0 Nmm}{1,0 * \frac{151,8 * 10^6 Nmm}{1,0}} + 0 \leq 1,0 = 0,46 \leq 1,0$$

$$\frac{246000 N}{0,59 * \frac{2084920 N}{1,0}} + 0,462 * \frac{75,4 * 10^6 Nmm + 0 kNm}{1,0 * \frac{151,8 * 10^6 Nmm}{1,0}} + 0 \leq 1,0 = 0,43 \leq 1,0$$

Yhteisvaikutuskaavat alle 1,0  $\rightarrow$  OK, rakenne kestää, kun määräävänä kuormana tuuli-  
likuorma. Tarkastetaan yhteisvaikutusehto vielä muuttuvan kuorman ollessa lumi-  
kuorma:

$$C_{my} = 0,55 > 0,4 \text{ Ok}$$

$$k_{yy} = 0,598 \leq 0,620; k_{zy} = 0,478$$

Yhteisvaikutusehdoista saadaan:  $0,39 \leq 1,0$  ja  $0,39 \leq 1,0 \rightarrow$  OK, rakenne kestää lumi-  
kuorman ollessa muuttuvana kuormana